
Entwicklung und Implementierung einer EPICS-basierten Beschleuniger- Steuerungsschnittstelle und automatisierten Strahloptimierung am S-DALINAC

**Development and implementation of an EPICS-based accelerator control interface and
automated beam optimisation at the S-DALINAC**

Dissertation von Thomas Schösser, Mai 2017



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Entwicklung und Implementierung einer EPICS-basierten Beschleuniger-Steuerungsschnittstelle und automatisierten Strahloptimierung am S-DALINAC

Vom Fachbereich Physik
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl. Phys. Thomas Schösser
aus Offenbach am Main

Referent: Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Pietralla
Korreferent: Prof. Dr. Joachim Enders

Tag der Einreichung: 16.05.2017
Tag der Prüfung: 12.06.2017

Darmstadt 2017
D 17

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich in zwei Teilen mit der Weiterentwicklung des Beschleuniger-Kontrollsystems am S-DALINAC.

Im ersten Teil wird die Finalisierung der EPICS-Migration des S-DALINAC Kontrollsystems vorgestellt. Dazu wurden die IOCs der Magnetsteuerung, der Leuchtschirme und des Video-Multiplexers in die EPICS-Umgebung eingebunden. Zusätzlich wurden OPIs für die Magnetsteuerung und die Leuchtschirme implementiert. Zur Konfiguration dieser IOCs und OPIs wird eine relationale Datenbank eingesetzt, die im Rahmen dieser Arbeit Erweiterungen unterzogen wurde. Die Ein- und Ausgabe der Magnetsteuerung erfolgt über Drehknöpfe und berührungsempfindliche Bildschirme, deren Hardware modernisiert wurde. Die durchgeführten Maßnahmen tragen seitdem zur Minderung von Störungen der Beschleunigersteuerung und einer erleichterten Bedienung bei.

Der zweite Teil thematisiert die automatisierte Optimierung der Einstellungen zur Strahloptik. Dazu wurde die Software *AreaDetector* ins S-DALINAC Kontrollsystem integriert. Die Funktionalität wird gezeigt, indem Quadrupolmagnete automatisiert ablenkfrei eingestellt wurden. Die Flexibilität der Software ermöglicht, in Zukunft auch andere Einstellungen automatisiert zu optimieren.

Abstract

This thesis is divided into two parts of improvements to the accelerator control system of the S-DALINAC.

In the first part the finalisation of the EPICS migration to the S-DALINAC control system is presented. Therefore the IOCs of the controls of magnets, the targets, and the video multiplexer are included into the EPICS framework. In addition to that the OPIs of the controls of magnets and targets are implemented. To configure these IOCs and OPIs a relational database is used, which was extended within this thesis. In- and output of magnet control is provided by rotating knobs and touch screens, which hardware were modernised. The realised steps are doing their part in reducing perturbations and ease up operations since.

The second part covers the automated optimisation of beam optics. Therefore the software *AreaDetector* was integrated into the S-DALINAC control system. The functionality is shown by the example of setting a quadrupol magnet deflection-free fully automated. Also the flexibility enables other setups to be automatically optimised in the future.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------|--|
| CAN | Controller Area Network |
| CPS | Can Power Supply |
| CSS | Control System Studio |
| DHIPS | Darmstadt High Intensity Photon Setup |
| EPICS | Experimental Physics and Industrial Control System |
| ERL | Energy Recovery Linac |
| ESCoRe | EPICS Save Compare Restore |
| IOC | Input Output Controller |
| NEPTUN | Niederenergie Photonen Tagger |
| OPI | Operator Interface |
| PV | Process Variable |
| S-DALINAC | Superconducting DArmstädter LINear ACcelerator |
| URL | Uniform Resource Locator |



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Vorwort | 7 |
| I. Finalisierung der EPICS-Migration am S-DALINAC | 9 |
| 2. Einleitung | 11 |
| 2.1. Beschleuniger zur Grundlagenforschung | 11 |
| 2.2. S-DALINAC | 12 |
| 3. Aufbau des Kontrollsystems am S-DALINAC | 15 |
| 3.1. Grundsätzliche Anforderungen an ein Kontrollsystem | 15 |
| 3.2. EPICS | 17 |
| 4. Migrierte Komponenten | 21 |
| 4.1. Relationale Datenbank | 21 |
| 4.2. Migration der CPS2001-Netzteile | 22 |
| 4.3. Drehknöpfe und berührungsempfindliche Bildschirme | 23 |
| 4.4. Strahldiagnose | 25 |
| 5. Resultate | 29 |
| 5.1. CPS-Netzteile | 29 |
| 5.2. Relationale Datenbank | 29 |
| 5.3. Hardware des OPIs zur Magnetsteuerung | 30 |
| 5.4. Software des OPIs zur Magnetsteuerung | 30 |
| 5.5. Multiplexer IOC | 30 |
| 5.6. Target IOC | 30 |
| 5.7. Ausgangsbasis für weitere Projekte | 31 |
| 6. Ausblick | 33 |
| 6.1. Einbindung neuer Geräte | 33 |
| 6.2. Automatisierte Erstellung des Übersichtsplans des S-DALINAC | 33 |
| 6.3. Erweiterung der relationalen Datenbank | 33 |
| 6.4. Automatisierte Optimierung | 33 |
| II. Automatisierte Optimierung der Strahlführung | 37 |
| 7. Einleitung | 39 |
| 7.1. Einstellung der Ablenkfreiheit für Quadrupolmagnete | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 8. Strahloptik | 41 |
| 8.1. Sollteilchenbahn | 41 |
| 8.2. Magnete | 42 |
| 8.3. Korrekturdipolmagnete | 43 |
| 8.4. Quadrupolmagnete | 46 |
| 8.5. Bewertungsfunktion | 47 |
| 9. Instrumente | 51 |
| 9.1. Bilderzeugung | 51 |
| 9.2. Digitalisierung der Bilddaten | 51 |
| 10. Messungen | 55 |
| 10.1. Demonstration der Funktionsfähigkeit des Messaufbaus | 55 |
| 10.2. Erkenntnisse zur Weiterentwicklung und Verbesserung | 58 |
| 10.3. Automatisierte Optimierung zu ablenkfreien Quadrupolmagneten | 65 |
| 11. Resultate | 71 |
| 11.1. Automatisierte Optimierung | 71 |
| 11.2. Erweiterte Diagnosemöglichkeiten | 71 |
| 11.3. Langzeitdiagnose | 71 |
| 11.4. Erweiterte Anzeigemöglichkeiten | 71 |
| 12. Ausblick | 73 |
| 12.1. Entwicklungen für OPI und IOC | 73 |
| 12.2. Verbesserung des Bildes | 73 |
| 12.3. Weitere Einsatzgebiete einer automatisierten Optimierung | 75 |
| 12.4. Bezug zu Anschlussprojekten | 75 |
| A. Anhang | 77 |
| A.1. Konfiguration des AreaDetector-IOCs | 77 |
| A.2. Automatisierte Optimierung - Skripte zur Steuerung | 86 |

1 Vorwort

Die vorliegende Arbeit behandelt Themen zum Kontrollsystem des Elektronenbeschleunigers S-DALINAC. Um eine thematische Trennung zwischen Weiterentwicklungen bestehender Komponenten von Entwicklungen neuer Komponenten zu erreichen, wurde die Arbeit in zwei Teile aufgeteilt.

Der erste Teil stellt Weiterentwicklungen und Verbesserungen bestehender Komponenten vor, die zur Finalisierung der Migration auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem benötigt wurden. Ein kurzer Überblick ordnet Beschleunigeranlagen in den Kontext der Grundlagenforschung ein und führt thematisch zum S-DALINAC, der Anlage, an der die vorliegende Arbeit angefertigt wurde. Ein Kapitel über Kontrollsysteme bildet eine Überleitung zum Kontrollsystem des S-DALINAC. Die Diskussion von Besonderheiten und Problemen dieses Kontrollsystems führen zur Motivation dieses Teils der vorliegenden Arbeit. Die einzelnen Komponenten des Kontrollsystems, die im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurden und die Finalisierung der Migration auf ein EPICS-basiertes System bedeuten, werden im Detail vorgestellt. Erreichte Resultate bilden mit einem Ausblick den Abschluss des ersten Teils.

Der zweite Teil stellt Neuentwicklungen und Erweiterungen vor, die für eine automatisierte Optimierung benötigt werden. Zum Verständnis der Ausführungen werden vorab Grundlagen zur Strahloptik diskutiert. Die ablenkende Wirkung von Dipolmagneten und Quadrupolmagneten, sowie die fokussierende Wirkung von Quadrupolmagneten werden behandelt, um die Eigenschaft ablenkfrei eingestellter Quadrupolmagnete zu erklären. Auf diese Einstellung bezieht sich die vorgestellte Bewertungsfunktion, die zur Quantifizierung dieser Ablenkung dient. Ein Kapitel über die dazu notwendige Technik, wovon ein Teil am S-DALINAC erstmals eingesetzt wurde und über die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und eingesetzte Software schließt daran an. Die Funktionstüchtigkeit einer automatisierten Optimierung der Strahloptik wird anhand der durchgeführten Messungen zur Ablenkung des Elektronenstrahls durch Quadrupolmagnete gezeigt. Die Kapitel zu Resultaten und Ausblick bilden den Abschluss dieser Arbeit.



Teil I.

**Finalisierung der
EPICS-Migration am
S-DALINAC**



2 Einleitung

2.1 Beschleuniger zur Grundlagenforschung

Der erste Beschleuniger, auch wenn diese Bezeichnung damals noch nicht so Verwendung fand, wurde 1897 [1] mit der Erfindung der Kathodenstrahlröhre von Ferdinand Braun entwickelt. Aus einer Kathode traten Elektronen aus, die elektrostatisch beschleunigt wurden und auf einen Schirm zur Anzeige trafen. Die tatsächliche Entwicklung von Beschleunigern begann zwischen 1911 [2, 3] mit Beobachtungen zur Struktur von Atomen durch Ernest Rutherford und den 1930er Jahren [4, 5].

Seither wurden Beschleuniger stetig weiterentwickelt, vor allem, um dem Wunsch nach höherer Energie zu entsprechen. Die ersten Beschleuniger nutzten statische elektrische Felder zur Beschleunigung und waren damit auf eine Energie von einigen MeV begrenzt, da die Vermeidung von Koronabildung für höhere Energien technisch nicht realisierbar ist [4]. Mit Wechselfeldern lässt sich diese Grenze überwinden, allerdings ist eine Beschleunigung eines kontinuierlichen Strahls damit nicht möglich.

Um Wechselfelder nutzen zu können, muss dem Teilchenstrahl eine Zeitstruktur mit einer Frequenz aufgeprägt werden, deren natürliches Vielfaches der Frequenz der Wechselfelder entspricht. Sind diese beiden Frequenzen gleich, wird die Bezeichnung *continuous wave* verwendet.

Aus diesen Ansätzen hat sich bis heute eine Vielfalt unterschiedlicher Beschleunigerkonzepte entwickelt. So können z.B. schwere Ionen (GSI, Darmstadt), Protonen (LHC, Schweiz) oder Elektronen (S-DALINAC, Darmstadt) beschleunigt werden. Dazu stehen unter anderem Microtron- (MAMI, Mainz), Synchrotron- (LHC, Schweiz) oder Linearbeschleuniger (S-DALINAC, Darmstadt) zur Verfügung. Der Energiebereich reicht bis 7 TeV [6] Kollisionsenergie, es existieren Speicherringe mit einem Umfang von 26,7 km [7] und Linearbeschleuniger mit 3 km [8] Länge. Unter anderem erzeugen neben Synchrotrons auch freie Elektronen Laser hochenergetische Photonen [9, 10, 11].

Die größten Beschleunigeranlagen werden zur physikalischen Grundlagenforschung eingesetzt. Mit hochenergetischen Teilchen werden fundamentale Wechselwirkungen erforscht und ein tieferes Verständnis über die Struktur der Materie gesucht. Das Anwendungsgebiet von Beschleunigern beschränkt sich jedoch keinesfalls auf die physikalische Grundlagenforschung. In der Medizin werden Beschleuniger zur Tumorthherapie eingesetzt [12], die Biologie und die Materialwissenschaften setzen ebenfalls Beschleuniger ein. Industrielle Anwendungen erweitern das Spektrum unter anderem um das Elektronenstrahlschweißen.

Die ständig steigenden Anforderungen durch die Experimente an die Beschleuniger nach höherer Energie und besserer Strahlqualität führen zu immer komplexeren Anlagen. Zur Steuerung dieser Anlagen sind Kontrollsysteme notwendig, die speziell an die Anforderungen von Beschleunigern angepasst sind.

2.2 S-DALINAC

In diesem Abschnitt wird zunächst der Beschleuniger vorgestellt. Anschließend wird kurz auf die vier Experimentierplätze eingegangen.

2.2.1 Beschleuniger

Das zentrale Großforschungsgerät des Instituts für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt ist der supraleitende rezirkulierende darmstädter Elektronen Linearbeschleuniger S-DALINAC. Seit 1991 [13] wird damit Grundlagenforschung für Kernphysik und nukleare Astrophysik, sowie Forschung zur Weiterentwicklung von Beschleunigern betrieben [14]. Die Anlage liefert einen Elektronenstrahl in einem Energiebereich von 2 MeV bis 130 MeV mit einem Strom von unter 1 nA bis $60\mu\text{A}$. Mit einer Resonanzfrequenz von 3 GHz, ermöglichen supraleitende hochreine Niobkavitäten einen dauerhaften Strahlbetrieb.

Der S-DALINAC ist organisatorisch in Sektionen unterschiedlicher Funktion eingeteilt, die in der schematischen Abb. 2.1 der Anlage farblich hinterlegt sind.

Der Beschleuniger verfügt über zwei Elektronenquellen, einer thermionischen und einer polarisierten Quelle. In der thermionischen Quelle werden freie Elektronen durch thermische Emission aus einem Glühdraht ausgelöst und mit einer Hochspannung von 250 kV elektrostatisch beschleunigt. Die im Dauerstrichbetrieb erzeugten Elektronen gelangen so in den normalleitenden Teil des Injektors. Die polarisierte Quelle [15, 16, 17] ist in Abb. 2.1 lila hinterlegt, dieser Bereich trägt das Kürzel *P*. Von einem Laser durch Photoemission ausgelöste polarisierte Elektronen werden mit einer Hochspannung von 100 kV statisch vorbeschleunigt und in den Injektor eingebracht. Die Laser dieser Quelle können Elektronenpakete mit Frequenzen von 0,6 MHz [18] bis 3 GHz erzeugen [19, 20].

Von einer Quelle aus erreichen die Elektronen den Injektor (I), in Abb. 2.1 hellgrün hinterlegt. Im normal leitenden vorderen Teil des Injektors wird dem Elektronenstrahl durch die Anordnung aus Chopper und Schlitzblende eine 3-GHz-Struktur aufgeprägt. Prebuncher fokussieren die Elektronenpakete longitudinal auf die erste Zelle der ersten supraleitenden Kavität. Der supraleitende Teil des Injektors beschleunigt die Elektronen auf eine Energie von 2 MeV bis zu 10 MeV bei einem Strom von bis zu $60\mu\text{A}$. Vom Injektor aus kann der Strahl entweder zum Experimentierplatz *DHIPS* oder über einen 180° Bogen in den Hauptbeschleuniger geleitet werden.

Der Hauptbeschleuniger (A) ist in Abb. 2.1 hellblau hinterlegt. In acht 20-zelligen Kavitäten wird der Strahl pro Durchlauf mit einer Energie von bis zu 30 MeV beschleunigt, wodurch die Elektronenstrahlen vom Separationsdipolmagnet auf unterschiedliche Bahnen gelenkt werden und so den jeweiligen Rezirkulationsbogen und die Extraktionsstrahlführung erreichen. Seit [21] verfügt der S-DALINAC über drei Rezirkulationen. Die erste Rezirkulation (F) ist in Abb. 2.1 hellrot, die zweite (S) orange und die dritte (T) türkis hinterlegt. Wird der Hauptbeschleuniger viermal durchlaufen, können Elektronen mit einer Energie von bis zu 130 MeV in die Extraktion (E), in Abb. 2.1 schwarz hinterlegt, eingebracht und damit zu drei Experimentierplätzen geleitet werden.

Die verfahrenbare Weglänge der Rezirkulation ermöglicht einen ERL-Betrieb [21] (Energy Recovery Linac), bei dem die Elektronenpakete 180° phasenverschoben in die Beschleunigerstrukturen eingebracht werden.

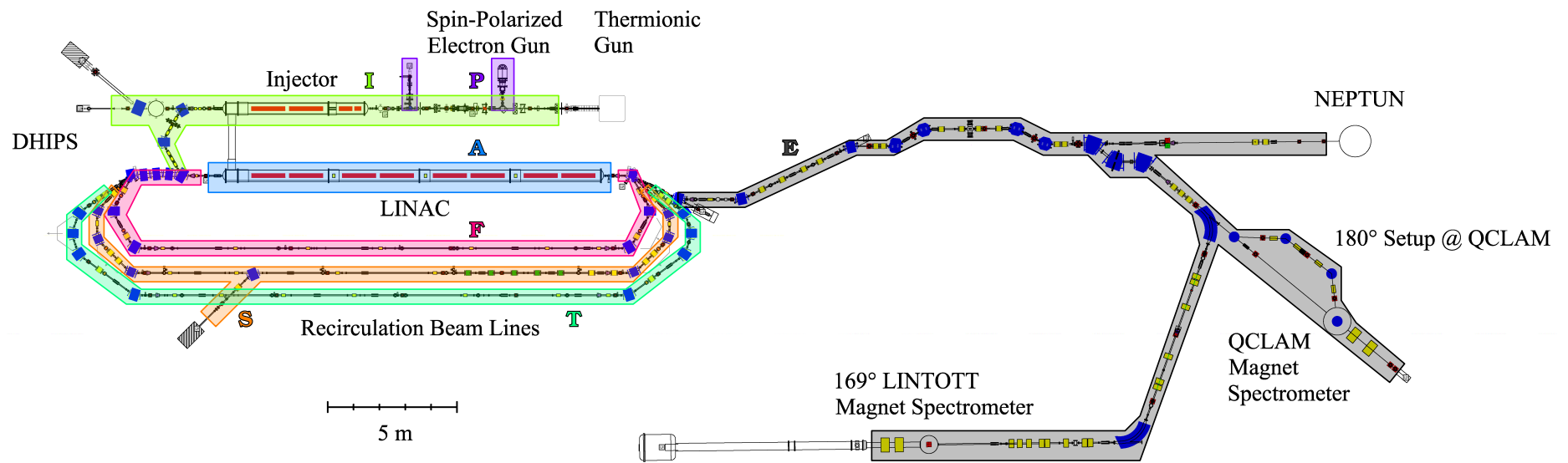


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau des S-DALINAC. Farblich hervorgehoben sind die unterschiedlichen Sektionen des Beschleunigers: Polarisierte Quelle (P) lila, normal und supraleitender Injektor (I) hellgrün, Hauptbeschleuniger (A) hellblau, die erste Rezirkulation (F) pink, die zweite (S) orange und die dritte (T) türkis, sowie die Extraktionsstrahlführung (E) in schwarz.

Dadurch regen die Elektronen das Feld in der Kavität an, wodurch sie ihrerseits Energie verlieren, und damit eine Rückgewinnung der Energie ermöglichen. Diese Energie steht zur Verfügung, um weitere Teilchen zu beschleunigen oder die zur Beschleunigung notwendige Hochfrequenzleistung zu senken.

Der S-DALINAC ist eine Anlage, an der neben Kern- und nuklearer Astrophysik auch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zu Beschleunigerthemen, wie Diagnose, Strahlführung und Strahloptimierung durchgeführt werden.

2.2.2 Experimente am S-DALINAC

In gerader Verlängerung des Injektorbereichs gelangt der Elektronenstrahl auf ein Target, mit dem ein intensives, kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum erzeugt wird [22, 23]. Diese Strahlung trifft auf die zu untersuchenden Kerne und regt diese an. Das Spektrum des Zerfalls der angeregten Zustände wird mit hochreinen Germaniumdetektoren gemessen. Diese Methode wird als Kernresonanz-Fluoreszenz-Spektroskopie bezeichnet. Am Experimentierplatz *DHIPS* sind außerdem Experimente zur Photospaltung möglich.

Durch die Extraktionsstrahlführung gelangen die Elektronen zu den Experimentierplätzen *Neptun*, *Q-Clam* und *Lintott*

Der Niederenergie-Photonen-Tagger *Neptun* nutzt ebenfalls Bremsstrahlung, um Atomkerne anzuregen und den Zerfall dieser Anregungen zu messen [24, 25, 26]. Zusätzlich wird die Energie des Elektrons, das auf das Bremstarget traf, gemessen, um aus der Differenz der Energie dieses Elektrons vor und hinter dem Bremstarget die Energie des anregenden Photons in einer Koinzidenzmessung zu bestimmen. Dies ermöglicht eine energieaufgelöste Messung der Wirkungsquerschnitte.

Am Spektrometer *Q-Clam* treffen die Elektronen des Beschleunigers auf die Probe des zu vermessenden Nuklids und werden an diesem gestreut. Die gestreuten Elektronen werden über einen Magnet energieaufgelöst auf die Detektorfläche gelenkt [27, 28]. Das gesamte Spektrometer ist drehbar, womit unterschiedliche Streuwinkel zugänglich werden. Das *Q-Clam*-Spektrometer kann außerdem um 180° gestreute Elektronen messen [29, 30].

Der vierte Experimentierplatz wird als *Lintott* bezeichnet. Hier werden Elektronen an einem Target gestreut, die gestreuten Elektronen werden von einem Magneten auf die Detektorfläche gelenkt. Dieses Spektrometer ist ebenfalls drehbar, um verschiedene Streuwinkel einstellen zu können [31, 32, 33]

3 Aufbau des Kontrollsystems am S-DALINAC

In diesem Kapitel werden Kontrollsysteme behandelt, die an sie gestellten Anforderungen diskutiert und die Weiterentwicklung des Kontrollsystems am S-DALINAC motiviert.

3.1 Grundsätzliche Anforderungen an ein Kontrollsystem

Eine komplexe Anlage, wie ein Beschleuniger, bestehend aus hunderten einzelner Geräte, benötigt ein Kontrollsystem zur Steuerung und Diagnose. Von einem Kontrollraum aus soll der Zugriff auf alle Geräte möglich sein. Die Notwendigkeit einer Fernsteuerung durch ein Kontrollsystem ist schon aufgrund der Größe von Beschleunigeranlagen gegeben. Die gesamte Strahlführung des S-DALINAC weist eine Länge von etwa 200 m¹ [34] auf. Eine Fernsteuerung ist außerdem aus Gründen des Strahlenschutzes gefordert. Die Anforderungen an das Kontrollsystem eines Beschleunigers werden im Folgenden in zwei Gruppen eingeteilt.

3.1.1 Hohe Verfügbarkeit

Um Vorgaben des Experimentes einer mehrwöchigen Strahlzeit erfüllen zu können, muss der Beschleuniger über die gesamte Dauer einen stabilen Strahl innerhalb der vom Experiment vorgegebenen Toleranzen gewährleisten. Treten größere Abweichungen auf, muss die Messung unterbrochen werden, um Korrekturen an der Beschleunigereinstellung vornehmen zu können.

Daraus leitet sich die Anforderung von Stabilität des Kontrollsystems ab. Technische Störungen oder Ausfälle am Kontrollsystem können ebenfalls zu Unterbrechungen der Strahlzeit führen. Daraus leiten sich Anforderungen zur Redundanz der im Kontrollsystem verwendeten Geräte, zur schnellen Wiederherstellung von Software nach einem Ausfall und zum zeitnahen Ersatz defekter Geräte ab.

3.1.2 Minimierung des Arbeitsaufwands

Die Minimierung des Arbeitsaufwands bezieht sich auf den gesamten, langfristig zu bewertenden Arbeitsaufwand. So ist ein kurzfristiger erheblicher Aufwand, wie er durch die Migration des gesamten Kontrollsystems entsteht, gerechtfertigt, wenn dadurch der Arbeitsaufwand für Wartung oder neue Implementierungen entsprechend sinkt. In Analogie zu [35, 36] kann der Arbeitsaufwand als Investition gesehen werden. Eine große Investition zu Beginn eines Projektes kann dabei zwar kurzfristig die gesamten personellen Ressourcen binden, was sich jedoch mittel- und langfristig in einer deutlich besseren Rendite widerspiegelt. Für viele Komponenten

¹ Der Injektorbereich umfasst dabei etwas mehr als 22 m, der Hauptbeschleuniger hat eine Länge von rund 14 m, auf die Rezirkulationen entfallen etwa 106 m, die Extraktion geht mit etwa 55 m Länge ein, was sich zu einer Gesamtlänge von etwa 197 m addiert.

eines Kontrollsystems gilt, dass sich der Aufwand, der betrieben wurde, um die Komponenten zu integrieren, erst später, in Form von Zeitersparnissen bezahlt macht, was auch ins Bild der Investitionen passt.

Ein Teil der zeitlichen Ressourcen des Personals, die dem Kontrollsystem zur Verfügung stehen, werden durch die tägliche Wartung verbraucht. Arbeitsaufwand entsteht auch bei der Erweiterung bestehender Komponenten. Größere Investitionen entsprechen der Integration neuer Geräte ins Kontrollsystem. Dabei können Weiterentwicklungen oder Neuentwicklungen im Kontrollsystem, auch mit großem Aufwand, eine Verbesserung darstellen, wenn die für Wartung notwendige Zeit entsprechend sinkt oder, wie im Falle der Magnetsteuerung, Ausfälle mit Wirkung auf die Strahlzeit, verhindert werden können. Der gesamte Arbeitsaufwand kann durch eine Vereinfachung der Einarbeitung in das Kontrollsystem aus technischer Sicht reduziert werden. Einheitliche und übersichtliche Bedienung reduziert den Arbeitsaufwand im regulären Betrieb und kann dabei auch die Einarbeitungszeit in die Bedienung des Beschleunigers verringern. Im Falle des S-DALINAC, an dem für Messungen unterbrechungsfrei über einen Zeitraum von bis zu mehreren Wochen Daten aufgenommen werden, werden studentische Hilfskräfte zur Unterstützung eingesetzt. Die Einarbeitungszeit dieses Personals ist bei der Bewertung des gesamten Arbeitsaufwandes ebenfalls einzubeziehen.

Die Konzepte zur Reduzierung des Arbeitsaufwandes orientieren sich am jeweiligen Problem. Das Kontrollsystem *EPICS* (Experimental Physics and Industrial Control System) war ursprünglich lediglich als Prototyp eines HF-Kontrollsystems² vorgesehen. Da die Implementierung des neuen System weniger Aufwand bedeutete und eine sehr hohe Stabilität leistete, wurde die Entscheidung getroffen, das gesamte Kontrollsystem der Migration auf EPICS zu unterziehen [37].

Ein recht großer Arbeitsaufwand wird durch *Insellösungen* erzeugt. Darunter sind abgeschlossene Subsysteme innerhalb des Kontrollsystems zu verstehen, die keine, oder nur mit sehr großem Aufwand verbundene Kommunikation zum Rest des Kontrollsystems haben. Die Anzahl dieser Insellösungen ist so gering wie möglich zu halten. Wartungsmethoden oder Software-Aktualisierungen müssen für jede dieser Lösungen individuell erarbeitet werden. Für jede dieser Insellösungen wird Zeit zur Einarbeitung benötigt. Daraus folgt die Anforderung, dass ein umfangreicheres System, welches für alle Geräte des Beschleunigers eingesetzt werden kann, einer Vielzahl von verschiedenen einfacheren Systemen vorzuziehen ist. Dies motiviert die Migration des gesamten Kontrollsystems des S-DALINAC auf ein EPICS-basiertes System [38, 39, 40].

Ein vereinheitlichtes Konzept zur Anzeige des Zustands und Steuerung verringert die Einarbeitungszeit in die Bedienung des Beschleunigers. CSS (Control System Studio) bietet eine EPICS-Schnittstelle und eine umfangreiche Bibliothek an graphischen Elementen zur Anzeige und Steuerung an. Automatisierungen für die Wartung und Störungsbeseitigung können in ein einheitliches Kontrollsystem mit geringerem Aufwand integriert werden.

Typischerweise beginnen Veränderungen am Kontrollsystem mit einer kleinen Erweiterung, die entweder nach kurzer Zeit verworfen oder weiterentwickelt und angepasst wird. Mit der Zeit wachsen solche Erweiterungen, die in einigen Fällen zu Insellösungen geführt haben [41, 42]. Zu den größeren Veränderung zählt das 2001 neu eingerichtete Kontrollsystem in einer hausinternen Lösung [43]. Die 2006 eingeführte Server-Client Struktur [44] erwies sich bei Änderungen der Programmierung der Hardware als zu statisch und wartungsintensiv [37]. Die Anforderung nach graphischen Benutzeroberflächen konnte vom vorhandenen System genauso

² Die Hochfrequenzregelung regelt Beschleunigerstrukturen

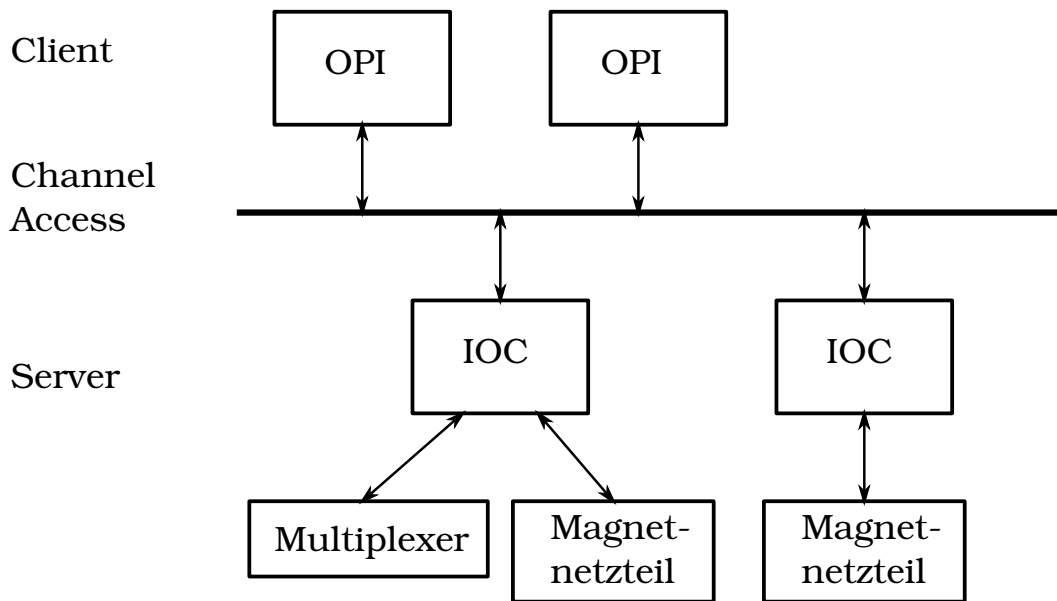


Abbildung 3.1.: EPICS besitzt eine Server-Client-Struktur. Die Hardwarekommunikation wird von IOCs (Input Output Controller) geleistet, die Benutzeroberflächen werden von den OPIs (Operator Interface) bereitgestellt. Zur Kommunikation wird das Channel Access Protokoll verwendet.

wenig erfüllt werden, wie die einfache nachträgliche Implementierung von Steuerungsalgorithmen.

Die Einführung einer relationalen Datenbank 2008 [45], auf die auch die vorliegende Arbeit zurückgreift, gemeinsam mit der in 2012 [37] begonnenen und 2016 [36] fortgesetzten Migration auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem bilden die Ausgangssituation für die vorliegende Arbeit und die Motivation der Finalisierung der Migration des S-DALINAC auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem.

3.2 EPICS

Die Software *EPICS* [46, 47] (Experimental Physics and Industrial Control System) ist ein Framework, um ein verteiltes Kontrollsystem aufzubauen, das eine große Zahl von Rechnern, die über ein Netzwerk verbunden sind, umfasst. Dabei ist EPICS nicht auf ein bestimmtes Betriebssystem begrenzt und als Open-Source-Projekt verfügbar. Es wird weltweit eingesetzt [48] und von einer großen Community unterstützt. Über eine Client-Server-Struktur werden die Daten über das Netzwerk zwischen den Rechnern ausgetauscht.

Ein *IOC* (Input Output Controller) stellt die Verbindung zwischen Kontrollsystem und Hardware, wie Magnetnetzteilen, dar. Die Parameter des Geräts werden vom IOC in *PVs* (Prozess Variablen) übertragen. Über das *Channel-Access-Protocol* kann ein *OPI* (Operator Interface) durch die *PVs* auf diese Parameter zugreifen. Dies ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt.

Input Output Controller: Die Funktionalität eines EPICS-Systems liegt vor allem bei den IOCs, die Informationen zum Zustand eines Gerätes besitzen. Diese Informationen können durch *PVs* verarbeitet und übertragen werden, so kann z.B. aus Strom und Spannung eines Netzteils dessen Leistung ermittelt und über eine *PV* zur Verfügung gestellt werden. Ein defektes Gerät, das ersetzt werden muss, könnte bedingt durch unterschiedliche Hersteller eine

andere Schnittstelle aufweisen. Dazu muss lediglich die Kommunikation zwischen IOC und der Hardware angepasst werden, die PVs zum Zustand des Geräts, bleiben die gleichen. Damit ergibt sich für ein OPI kein Unterschied, wodurch kein weiterer Arbeitsaufwand für Anpassungen entsteht. Die Kommunikation zwischen den am S-DALINAC eingesetzten CPS-Netzteilen³ und den EPICS-IOCs wird von dem hausintern entwickelten TUD-Socket-Can [49] gewährleistet.

Channel-Access-Protokoll: CA *Channel-Access-Protocol* [50, 51] dient als Kommunikationsprotokoll und setzt auf udp und tcp auf [36]. Dadurch wird den OPIs ermöglicht, durch PVs auf Parameter von Geräten zuzugreifen, ohne die Netzwerkadressen der IOCs zu kennen, mit denen das entsprechende Gerät verbunden ist. Allein die Kenntnis des Namens der PV ist ausreichend. Daraus entstehen Vorteile für die Wartung und Bedienung, wie z.B. das Umziehen eines IOCs verbunden mit einer neuen Netzwerkadresse, ohne dafür Anpassungen auf OPIs durchführen zu müssen.

Prozess-Variable: Die Daten in PVs werden von *Records* repräsentiert, wobei jede PV über mehrere Records verfügt. In Records werden unter anderem der Name einer PV, Wert, Einheit, aber auch Metadaten, wie der Alarmzustand gespeichert. Die Records einer PV werden in einer Datenbank auf dem jeweiligen IOC abgelegt [37]. Ein Nachteil von EPICS ist der flache Namensraum der PVs. Innerhalb der PVs existiert keine Hierarchie, so dass es nicht möglich ist, alle PVs eines Magneten durch eine Kontrollsystemstruktur zusammenzufassen. Dies wird am S-DALINAC umgangen, indem allen PVs eines Gerätes das gleiche Namens-Präfix zugewiesen wird. Wird innerhalb einer Netzwerkdomeäne der Name einer PV mehrfach verwendet, wird eine Verbindung zu dem IOC aufgebaut, der am ehesten antwortet. Dies kann zu Inkonsistenzen führen, weshalb ein System notwendig ist, das während der Konfiguration eines IOCs sicherstellt, dass keine Namen für PVs mehrfach verwendet werden.

Operator Interface: OPIs stellen durch Oberflächen die Schnittstelle zwischen dem Benutzer des Beschleunigers und dem Kontrollsystem dar. Sie greifen über PVs auf die Parameter von Geräten, wie Netzteilen, zu, die von IOCs bereitgehalten werden. Da der Name einer PV ausreicht, um eine Verbindung aufzubauen, muss ein OPI keine Netzwerkadressen von IOCs kennen. Daraus entsteht eine große Flexibilität, so kann eine Überwachung des Beschleunigers von einem beliebigen Rechner aus erfolgen⁴. EPICS erlaubt den gleichzeitigen Zugriff auf eine PV durch beliebig viele OPIs und IOCs. Damit kann die gleiche Aufgabe von mehreren OPIs wahrgenommen werden und die Herstellung von Redundanz wird einfacher möglich. Mit Ausnahme der berührungsempfindlichen Bildschirme, die weiter unten vorgestellt werden, bildet die Benutzerschnittstelle des extern entwickelten Open-Source-Projekts CSS [52, 53, 54, 55] die OPIs am S-DALINAC. Dabei wurde CSS in die Entwicklungsumgebung *Eclipse* einprogrammiert [56, 57].

Die Entwicklung von EPICS wird von vielen Institutionen getragen. Dabei handelt es sich meist um große Beschleunigeranlagen, die eine hohe Stabilität der Kontrollsystemsoftware fordern. Diese Stabilität kommt auch dem S-DALINAC zugute. Allerdings bringt dies den Nachteil mit sich, dass die Fortentwicklung erschwert wird. Damit die Kontrollsysteme dieser Anlagen stabil laufen, werden sie jahrelang unverändert betrieben, da Stabilität Vorrang vor neuen Funktionen hat.

³ Hausintern von der Elektronikwerkstatt entwickelt

⁴ Die Überwachung des Beschleunigers erfordert eine Liste der PVs, eine Netzwerkverbindung zum Beschleunigernetzwerk, sowie die Software zum Auslesen der PVs durch das Channel-Access-Protokoll. Ein Bürorechner kann diese Forderungen erfüllen.

4 Migrierte Komponenten

Die verbesserte Stabilität und Zuverlässigkeit des Kontrollsystems ist neben der Reduzierung des Aufwands, der zur Wartung und zur Einarbeitung in das eingesetzte System aufgebracht werden muss, die wesentliche Motivation zur Finalisierung der Migration auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem.

Die gesamte Migration zu einem ausschließlich auf EPICS-basierendem Kontrollsystem fand in einem kontinuierlichen Prozess über sechs Jahre hinweg statt [40, 39, 38].

Jedes migrierte Teilsystem, wurde zunächst einer Testphase unterzogen, bevor es am Beschleuniger eingesetzt wurde. In manchen Fällen wurde das auf EPICS migrierte System parallel zum bisher vorhandenen System betrieben, um einen direkten Vergleich ziehen und im Notfall auf das alte System zurückgreifen zu können. Dabei setzte sich stets das EPICS-basierte System durch. So reduzierte sich die Zahl der alten Systeme stetig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Migration zu einem EPICS-basierten System abgeschlossen. Ein wesentlicher Teil dieser Migration betrifft die Drehknöpfe und berührungsempfindlichen Bildschirme im Kontrollraum als zentrale Steuerkonsole der Strahloptik. Vorarbeiten an der relationalen Datenbank und dem IOC der Magnetnetzteile vom Typ *CPS2001* stellen die dafür notwendige Infrastruktur zur Verfügung.

Die Migration der Strahldiagnose, bestehend aus Leuchtschirmen, Kameras, Multiplexer und Digitalisierer stellte den letzten Schritt und damit den Abschluss der Migration auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem dar.

4.1 Relationale Datenbank

Eine *relationale Datenbank* ist eine Datenbank, deren Tabellen durch *Relationen* miteinander in Beziehung gesetzt werden. Die Relation beschreibt dabei eine Vorschrift, wie die Daten der einzelnen Tabellen zusammenhängen.

Um die Funktionsweise der relationalen Datenbank zu veranschaulichen sind in Abb. 4.1 drei Tabellen exemplarisch dargestellt. Die blau hinterlegten Tabellen beinhalten Daten, die sich auf Hardware beziehen, während die gelb hinterlegte Tabelle Daten enthält, aus denen die Relation der beiden anderen Tabellen hervor geht. So enthält die Tabelle *can.segments* Informationen über die Bezeichnung eines Servers *canioc01*, die Nummer des Segments und weitere Daten, wie die Netzwerkadresse. Die Tabelle *pse.loads* enthält Daten zu Magneten, die am Beschleuniger eingesetzt werden. Aufgelistet sind der intern für einen Magneten verwendete

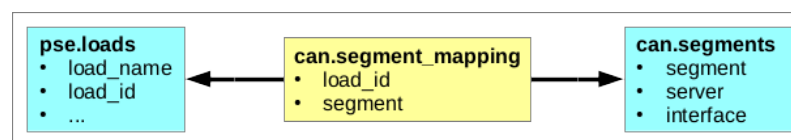


Abbildung 4.1.: Die Relation *can.segment_mapping* weist jeder *load_id* aus *pse.loads* ein *segment* aus *can.segments* zu.

te Name, z.B. *IOQU02* und eine eindeutige Identifikationsnummer, die als *load_id* bezeichnet wird. In Relation zueinander werden diese beiden Tabellen durch die gelb hinterlegte Tabelle *can.segments_mapping* gesetzt, die jeder Magnet-Identifikationsnummer ein Segment zuweist. Damit kann während der Erstellung eines IOCs mit dessen Namen ermittelt werden, welche Magnete dieser IOC steuert und somit die richtige Konfiguration aus der relationalen Datenbank erzeugt werden.

Die relationale Datenbank wurde im Rahmen von [45] implementiert. Sie hält die Daten, aus denen wichtige Teile des Kontrollsystems, speziell die IOCs, konfiguriert werden. Der *Archiver* ist ein Software-Werkzeug zum archivieren von Prozessdaten des S-DALINAC. Die Informationen, welche Daten auf welche Weise archiviert werden sollen, ist in der relationalen Datenbank festgehalten [58].

Schon einige Jahre vor der Einführung von EPICS am S-DALINAC wurde die relationale Datenbank im Kontrollsystem eingesetzt. Ergänzungen und Modifikationen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit an der relationalen Datenbank durchgeführt, um den Anforderungen zu genügen, die eine Konfiguration von EPICS-IOCs an diese stellt. Dazu wurden neue Tabellen angelegt und die Relationen zwischen diesen Tabellen entworfen. Umfangreiche Tests wurden durchgeführt, um sicher zu stellen, dass falsche Einträge in die Tabellen von der relationalen Datenbank schon während des Eintragens zurückgewiesen werden. Die neu erzeugten Tabellen wurde mit zuvor geprüften Daten über den Zustand des Beschleunigers gefüllt. Dazu zählten die Namen, Positionen, Baureihen und weitere Daten über die Magnetnetzteile, die jeweils angeschlossenen Magnete der Strahloptik mit Namen, Anschlussposition an die Netzteile, Spannungs- und Stromgrenzen.

Die relationale Datenbank wurde im Zuge dieser Weiterentwicklung um *history*-Tabellen ergänzt, die die zeitliche Veränderung des Inhalts einer Tabellen automatisch protokollieren. Damit kann z.B. zurückverfolgt werden, an welchen Positionen ein defektes CPS-Netzteil im Laufe der Zeit eingesetzt wurde, um dort gezielt nach Schäden suchen zu können.

In einer späteren Erweiterung der relationalen Datenbank wurden sämtliche Daten und Funktionen der Targets¹ implementiert.

Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen, alle Magnete und Targets aus der relationalen Datenbank heraus konfigurieren zu können.

4.2 Migration der CPS2001-Netzteile

In der Extraktionsstrahlführung, der in Abb. 2.1 schwarz hinterlegte Bereich, werden Netzteile des Typs *CPS84* eingesetzt. Da diese Geräte über keine Schnittstelle verfügen, mit der eine Verbindung zum CAN-Bus möglich wäre, werden die CPS84 Netzteile durch Adapterkarten ergänzt, die als *CPS2001* bezeichnet werden. Die Ansteuerung dieser Netzteile wurde, ausgehend von Entwicklungen für die CPS05- Netzteile [37], im Rahmen dieser Arbeit auf EPICS migriert. Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, alle Magnete der Strahlführung von einem EPICS-basierten System aus zu steuern.

¹ Mit *Targets* sind alle in den Strahl fahrbaren Geräte gemeint, die von *Target-Controllern* gesteuert werden. Dazu zählen selbstverständlich die Leuchtschirme, aber auch Faraday-Cups, Schlitzblenden und OTR-Targets



Abbildung 4.2.: Je vier Drehknöpfe sind in einer Baugruppe zusammengefasst.

4.3 Drehknöpfe und berührungsempfindliche Bildschirme

Die Schnittstelle aus Drehknöpfen und berührungsempfindlichen Bildschirmen wird im Kontrollraum des S-DALINAC eingesetzt, um Einstellungen der Strahloptiken des Beschleunigers zu optimieren. Da sich das zu Beginn dieser Arbeit bestehende System nicht für eine Migration eignete, wurde eine neue Schnittstelle entwickelt und implementiert. Mit den *Knobboards*, dem *SKI*, dem *BEAT-Server*, dem *qTarget* und den Target-Controllern lag ein System aus sehr unterschiedlichen Komponenten vor. Während *qTarget* Daten aus der relationalen Datenbank lud und auf einem Linux-System betrieben wurde, war die Datenbasis des *BEAT-Servers* lokal abgelegt und für ein Windows®-System entwickelt worden. Die Instabilitäten dieser Insellösung erforderten eine Neuentwicklung, mit der Voraussetzung die Funktionalität der Bedienung durch Drehknöpfe und berührungsempfindliche Bildschirme beizubehalten.

4.3.1 Drehknöpfe

Die Drehknöpfe des vorherigen Systems wurden aus Gründen der intuitiven Bedienung in das neue System übernommen. Die Drehknöpfe werden über eine hausintern entwickelte Elektronik mittels USB-Anschluss ausgelesen. Daraus ergibt sich die Anforderung an die zu entwickelnde Software, Eingaben über den USB-Anschluss zu verwenden. Die aktuelle Baugruppe ist in Abb. 4.2 gezeigt. Eine Elektroneinheit unterstützt bis zu vier Drehknöpfe, weshalb je vier Drehknöpfe in einer Baugruppe zusammengefasst sind.

4.3.2 Berührungsempfindliche Bildschirme

Die vom bisherigen System genutzten berührungsempfindlichen Bildschirme erfuhren nicht länger eine Herstellerunterstützung. Weiterentwicklungen der Betriebssysteme erforderten jedoch aktualisierte Software. Neuanschaffungen leistungsstärkerer Geräte lösten dieses Problem. Die



Abbildung 4.3.: Im Kontrollraum eingebaute berührungsempfindliche Bildschirme bilden die Benutzerschnittstelle zur Steuerung der Strahloptiken.

nun gewählten größeren berührungsempfindlichen Bildschirme verfügen neben dem Bildschirm über einen vollständigen PC in einer Baueinheit. Diese kompakte Bauweise erlaubt den schnellen Austausch eines solchen Gerätes. Abbildung 4.3 zeigt das eingebaute Gerät im Betrieb im Kontrollraum des S-DALINAC. Ein USB-Anschluss dieser Baueinheit stellt die Verbindung zu den Drehknöpfen her. Die Rechner werden redundant vorgehalten, so sind zwei baugleiche Systeme im Kontrollraum im Einsatz.

4.3.3 Operator Interface

Die Oberfläche des OPIs zur Magnetsteuerung ist in Abb. 4.4 dargestellt. Abweichend von den übrigen Komponenten des Kontrollsystems wurde für dieses OPI eigens ein Programm entwickelt. Die intuitive Bedienung der Strahloptiken durch die Drehknöpfe sollte erhalten bleiben. Daraus ergab sich die Anforderung, die über den USB-Anschluss ausgelesenen Daten auf unterschiedliche Weise zu verarbeiten. Das OPI unterstützt dabei in einem Modus die Auswahl der PV durch die Drehknöpfe, in einem weiteren Modus die Manipulation der gewählten PV. Die Anzeige besteht aus vier gleichen Abschnitten, die jeweils einen Drehknopf repräsentieren. Neben dem Namen der gewählten PV werden der Stromwert und einige weitere Metadaten angezeigt. Die Liste der ansteuerbaren Elemente wird durch ein Skript aus der relationalen Datenbank generiert. Die Programmierung des OPIs wurde mit der Programmiersprache C++ umgesetzt, für die Elemente der Oberfläche und die interne Mechanik des Programms wurde auf die Bibliothek *qt*[59] zurückgegriffen. Derzeit werden von dieser Schnittstelle 212 Magnete der Strahlführung gesteuert.

Die *qt*-Bibliothek *EPICS-qt* [60] bietet Vorteile gegenüber der *qt*-Bibliothek für den Aufbau einer Verbindung zwischen einem Element der Oberfläche, wie einer Schaltfläche oder der Anzeige eines Wertes und einer PV. Diese Verbindung muss jedoch aufgebaut werden, sobald die graphische Oberfläche erzeugt wird. Da die Elemente der Oberfläche jedoch zu verschiedenen PVs Verbindungen aufbauen und trennen müssen, konnte diese Funktion der Bibliothek *EPICS-*



Abbildung 4.4.: Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Oberfläche bildet die vier Drehknöpfe auf je einen der vier Bereiche ab. Für jeden Bereich stehen Kontrollen zu Manipulation der PVs zur Verfügung.

qt nicht genutzt werden. Da die Nutzung dieser Bibliothek keine weiteren Vorteile brachte, wurde auf eine entsprechende Implementierung verzichtet.

4.4 Strahldiagnose

Das wichtigste Diagnoseinstrument, welches zur Strahleinstellung benötigt wird, ist das bildgebende System aus Kamera und Leuchtschirm. Die mit Gold beschichteten Leuchtschirme [61] aus Beryllium-Oxid können in den Strahl gefahren werden und stehen im Blickfeld von Kameras, die das Signal zu einem Multiplexer weiterleiten. Dieser verbindet die 61 Kameras mit acht Ausgängen. Die Monitore im Kontrollraum sind mit diesen Ausgängen verbunden. Damit wird auf diesen Leuchtschirmen die Größe und Form des Strahls erkennbar. Die Ausgänge des Multiplexers sind außerdem mit den Eingängen des Digitalisierers verbunden, wodurch die Bilddaten digital abgerufen werden können.

Der IOC zur Steuerung des Multiplexers, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, wird auf einer *virtuellen Maschine* ausgeführt. Die Virtualisierung eines Rechners (Maschine) nutzt Software, die auf einer realen Maschine betrieben wird, um eine virtuelle Maschine zu simulieren. Dabei simuliert die Software alle Eigenschaften eines realen Rechners, wie CPU und Speicher. Auf einer realen Maschine können mehrere virtuelle Maschinen betrieben werden. Dadurch wird die Hardware effizienter ausgenutzt und Möglichkeit gegeben, sehr viele Maschinen ohne Mehrkosten für Hardware zu betreiben. Dieses Konzept erlaubt, für jeden IOC eine eigene virtuelle Maschine einzurichten, was die Konfiguration der einzelnen virtuellen Maschinen sehr einfach gestaltet [37].

Der IOC zur Steuerung der Leuchtschirme steuert ebenfalls die fahrbaren Faraday-Cups, sowie einige Schlitzblenden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieser IOC entworfen und implementiert.



Abbildung 4.5.: Die einfache Targetsteuerung nutzt für jedes Target eine Kopie der dargestellten Vorlage. Diese stellt Funktionen zum fahren des Targets (links oben) und der Monitorwahl (M1 bis M4) bereit und zeigt die Position des Targets an (grüne Fläche).

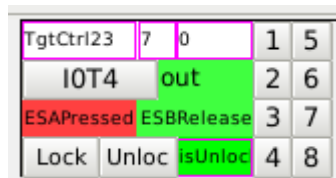


Abbildung 4.6.: Ausschnitt der Vorlage der vollständigen Targetsteuerung. Zusätzlich zu den Funktionen der einfachen Targetsteuerung lassen sich hiermit Targets gegen versehentliches fahren sichern (Lock, Unlock). Das Kamerasignal kann mit den Tasten 1 bis 8 auf jeden der acht Ausgänge des Multiplexers gelegt werden.

Der IOC steuert dazu die von der Elektronikwerkstatt hausintern entwickelte Kontrollelektronik zur Targetsteuerung über den CAN-Bus.

4.4.1 Target-OPI

Zur Kontrolle der Leuchtschirme und Monitoranzeigen wurde ein OPI entwickelt, welcher Teil der CSS-Umgebung ist. Dieses OPI weist die Besonderheit auf, das erste OPI des S-DALINAC zu sein, der vollständig aus Daten der relationalen Datenbank und den in Abb. 4.5 und Abb. 4.6 abgebildeten Vorlagen und erstellt wird. Dabei stellt das OPI zwei verschiedene Oberflächen bereit. Eine einfache, übersichtliche wird in Abb. 4.5 dargestellt und eine Oberfläche mit sämtlichen Informationen über ein Target, wie in Abb. 4.6 gezeigt.

Jedes dieser Elemente entspricht einem Target. Die Liste der Targets wird aus der relationalen Datenbank gelesen und damit das OPI für CSS erzeugt. Ein Ausschnitt davon ist in Abb. 4.7 gezeigt.



Abbildung 4.7.: Das mit Daten aus der relationalen Datenbank generierte Target OPI zur Steuerung der Leuchtschirme und Monitore. Dargestellt ist die übersichtliche Variante.



5 Resultate

Das wichtigste Resultat dieses Teils der vorliegenden Arbeit ist die Finalisierung der EPICS-Migration des Kontrollsystems des S-DALINAC. So wurden alle zum Betrieb notwendigen Geräte mit den Arbeiten [37, 36] und dieser Arbeit ins EPICS-Kontrollsystem überführt. Dabei leistete diese Arbeit einen erheblichen Umfang.

5.1 CPS-Netzteile

Für die CPS84 Netzteile mit den dazu gehörenden CPS2001 Adapterkarten wurden IOCs entworfen und integriert. Dadurch kann die gesamte Extraktionsstrahlführung vom EPICS-Kontrollsystem des S-DALINAC gesteuert werden.

5.2 Relationale Datenbank

Zwei Projekte dieser Arbeit erweiterten und modifizierten die relationale Datenbank, die wichtigste Grundlage zur Konfiguration der EPICS-IOCs am S-DALINAC. Dazu wurden die Strukturen zur Abbildung einerseits der Magnete zur Strahlsteuerung und andererseits der Targets geschaffen.

Struktur zur Abbildung der Magnete zur Strahlsteuerung

Wegen der Wichtigkeit der relationalen Datenbank für die Konfiguration der EPICS-IOCs und damit auch für die Stabilität und Zuverlässigkeit des Beschleunigerkontrollsystems wurden bei der Modifikation und Erweiterung der relationalen Datenbank mehrere Ebenen zur Überprüfung korrekter Eingaben implementiert. Die Daten werden zur Zeit der Eingabe bereits auf Konsistenz überprüft, so kann z.B. eine Position nicht gleichzeitig von zwei Geräten belegt werden. Um sicherzustellen, dass die implementierten Relationen, Abhängigkeiten, Regeln und Einschränkungen, die diese Überprüfungen zur Zeit der Eingabe vornehmen, korrekt umgesetzt wurden, wurde ein automatisiertes Testverfahren entwickelt, dass alle Möglichkeiten Einträge vorzunehmen systematisch prüft. Dabei wurden in 357 unterschiedlichen Szenarien alle erlaubten Einträge auf Gelingen, aber auch alle verbotenen Einträge auf Misslingen getestet. Diese Automatisierung wurde manuell auf ihre Richtigkeit hin evaluiert.

In diese Struktur der relationalen Datenbank wurden alle CPS-Netzteile und Magnete integriert. Die Daten stammten aus unterschiedlichen Quellen, was eine Prüfung auf Richtigkeit vorab notwendig machte, da die Quellen nicht zwingend Konsistent waren.

Struktur zur Abbildung der Targets

Das zweite Projekt erweiterte die relationalen Datenbank um Tabellen und Relationen, um die Daten des Target-IOCs darin abzubilden. Damit können zusätzliche Kamerasysteme mit geringem Aufwand am Beschleuniger ergänzt werden, die Namensgebung erfolgt nun automatisch und nach dem vorgegebenen Schema der Nomenklatur.

5.3 Hardware des OPIs zur Magnetsteuerung

Die Anschaffung der berührungsempfindlichen Bildschirme bedeutete im Kontrollraum eine optisch deutliche Veränderung. Diese Bildschirme bestehen in einer Baueinheit aus einem vollständigen Rechner, was die Integration als OPI erleichterte. Jedes Gerät bietet für sich den vollen Funktionsumfang. Somit ist die Steuerung nicht länger von einem einzelnen Rechner abhängig, was seit Inbetriebnahme zu einer signifikanten Verbesserung der Stabilität geführt hat.

Lediglich Probleme mit der Stabilität der USB-Verbindung zu den Drehknöpfen traten vereinzelt auf. Dieser Fehler wurde in unregelmäßigen Abständen von mehr als 24 Stunden beobachtet. Ein Neustart des OPIs beseitigt dieses Problem, so dass der betroffene OPI nach einigen Sekunden wieder betriebsbereit ist.

Die übrigen Rechner, IOCs oder der Strahlbetrieb sind davon nicht betroffen.

5.4 Software des OPIs zur Magnetsteuerung

Auf den in Kap. 5.3 genannten Rechnern läuft das OPI zur Magnetsteuerung. Die Listen der Geräte, die angesteuert werden können, werden von einem Skript aus der relationalen Datenbank heraus erzeugt. Beschränkungen auf die Ansteuerung von Magnetnetzteilen bestehen nicht. Lediglich der Wunsch der Operateure, keine HF-Einstellungen, wie Amplitude oder Phase der Kavitäten oder die Stromwerte der Umlenkdiplomagnete über dieses OPI zu steuern ist der Grund dafür, dass die entsprechenden PVs nicht in die Liste aufgenommen wurden.

5.5 Multiplexer IOC

Ein weiteres Projekt auf dem Weg zur vollständigen Migration war die Integration des Multiplexer-IOCs. Da die Funktionalität des Multiplexers eng mit dem Kamerasystem verbunden ist, besitzt der Multiplexer kein eigenes OPI, sondern wird über das Target OPI mitgesteuert. Der Multiplexer wird über eine TCP-IP Schnittstelle angesteuert, weshalb dieses IOC auf einer virtuellen Maschine eingerichtet wurde.

5.6 Target IOC

Das wichtige Projekt der Integration der Targets in die EPICS-Umgebung umfasste sowohl den IOC, als auch das OPI der Targetsteuerung. Ausgehend von der Hardwarekommunikation wurde der komplette Target IOC für eine EPICS-Umgebung im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Alle Funktionen die von der Hardware zur Verfügung gestellt werden, sind dabei über den IOC abrufbar. Dazu zählen neben dem Befehl zum Fahren der Targets die Auslese über die Position, Temperatur und weitere Metadaten.

Die Entwicklung des Target OPIs innerhalb der CSS Umgebung wurde in mehreren Schritten vollzogen. Die aktuelle Version des Target OPIs umfasst zwei unterschiedliche CSS Oberflächen. Eine vereinfachte Oberfläche, die unter dem Gesichtspunkt der bestmöglichen Übersicht und einfachen Bedienung entwickelt wurde und eine zweite Oberfläche, die volle Funktionalität und komplette Datenlage jedes einzelnen Targets abbildet.

Die Target OPIs (einfache und vollständige Version) sind die ersten am S-DALINAC automatisch erzeugten OPIs. Werden Kamerapositionen am Beschleuniger verändert, neu aufgebaut

oder zurückgebaut, müssen diese Änderungen in die relationale Datenbank eingetragen werden, damit die IOCs mit den aktuellen Daten konfiguriert werden können. Im Fall des Target OPI werden die Daten der relationalen Datenbank ebenfalls genutzt, um diese OPIs zu erstellen. Damit wurde ein weiterer Schritt zur Automatisierung von Arbeitsprozessen geschaffen, was eine Reduzierung des Wartungsaufwandes bedeutet.

5.7 Ausgangsbasis für weitere Projekte

Die Implementierungen, mit dieser Arbeit geleistet wurden, werden bereits als Basis für andere am Beschleuniger eingesetzte Module, wie EScRe (EPICS Save Compare Restore)[36] verwendet. Dieses Modul dient zur Organisation des Beschleunigerzustandes. Es bietet Funktionen zum speichern der Prozesswerte aller Geräte, wie Stromwerte der einzelnen Magnete, sowie Metadaten, wie Zeitpunkt und Zahl der genutzten Rezirkulationen, zum speichern an. Die so erzeugten Zustände können mit anderen gespeicherten Zuständen verglichen und eine Auswahl getroffen werden, für welche Geräte welche Einstellungen geladen werden sollen. Dies erleichtert die Voreinstellung aller Magnete eines Beschleunigerzustandes.



6 Ausblick

6.1 Einbindung neuer Geräte

Die vollständige Migration des Kontrollsystems bietet einen mit nur verhältnismäßig geringem Arbeitsaufwand verbundenen Zugang, am S-DALINAC vorhandene Geräte, die bislang nicht ins Kontrollsystem integriert waren, ebenfalls einzubinden.

6.2 Automatisierte Erstellung des Übersichtsplans des S-DALINAC


Die noch ungenutzte Anzeigefläche, der in Abb. 4.4 dargestellten Oberfläche des OPIs zur Strahlsteuerung, soll künftig dazu genutzt werden, ein Schema des Beschleunigers mit graphischer Hervorhebung der Magnete, die aktuell mit einem der Drehknöpfe verbunden sind, anzuzeigen. Dazu werden Daten benötigt, aus denen der Name und Typ eines Magneten, sowie die Lage im Raum hervorgeht. Im Rahmen von [21] wurden diese geodätischen Daten erhoben. Sind diese Daten über die relationale Datenbank abrufbar, kann damit automatisiert ein Übersichtsplan erstellt werden, aus dem neben dem in Abb. 2.1 gezeigten Bild auch die Koordinaten der Magnete auslesbar sind. Da die Daten dieses Plans der relationalen Datenbank entnommen werden, ist die Richtigkeit dieser Daten gewährleistet. Durch die automatisierte Erstellung steht jederzeit eine aktuelle Version des Plans ohne weiteren Arbeitsaufwand zur Verfügung. Im Zuge dieser Modifikation wird die Funktionalität der Direktwahlknöpfe für die Sektionen, die bereits in der Anzeige vorhanden, jedoch noch ohne Funktion sind, implementiert.

6.3 Erweiterung der relationalen Datenbank

Die hausintern entwickelten Elektronik zu Steuerung von Targets *target-controller*, zur Stromversorgung der Magnete *CPS05* und zum Messen *qm07* besitzen die gleiche Bauform als Einschubkarten und verwenden CAN-Bus zur Kommunikation. Bislang werden diese drei Typen von Elektronik in der relationalen Datenbank getrennt voneinander abgebildet. Um diese drei Insellösungen zusammenzuführen, wurde eine Modifikation der relationalen Datenbank entworfen, wie sie in Abb. 6.1 abgebildet ist. Dafür wird die Einbauposition, die, unabhängig vom Gerätetyp, nur einmal vergeben werden kann, als Relation vorgeschlagen. Der Rahmen, der die Elektronik hält, ist an den Typ der Elektronik angepasst und kann deshalb nur Geräte eines Typs tragen. Die äußere Bauform dieser Rahmen sind standardisiert. Diese Eigenschaften bildet die vorgeschlagene Modifikation der Tabellenstruktur ab. Umfangreiche Tests dieser Modifikation sind vor der Implementierung noch durchzuführen.

6.4 Automatisierte Optimierung

Mit der Finalisierung der Migration wurden die Voraussetzungen für eine automatisierte Optimierung geschaffen, die im zweiten Teil dieser Arbeit vorgestellt wird. Basierend auf den IOCs



zur Magnetsteuerung und Targetsteuerung ist der rechnergestützte Zugriff auf alle Geräte der Strahloptik und Bildgebung geschaffen worden.

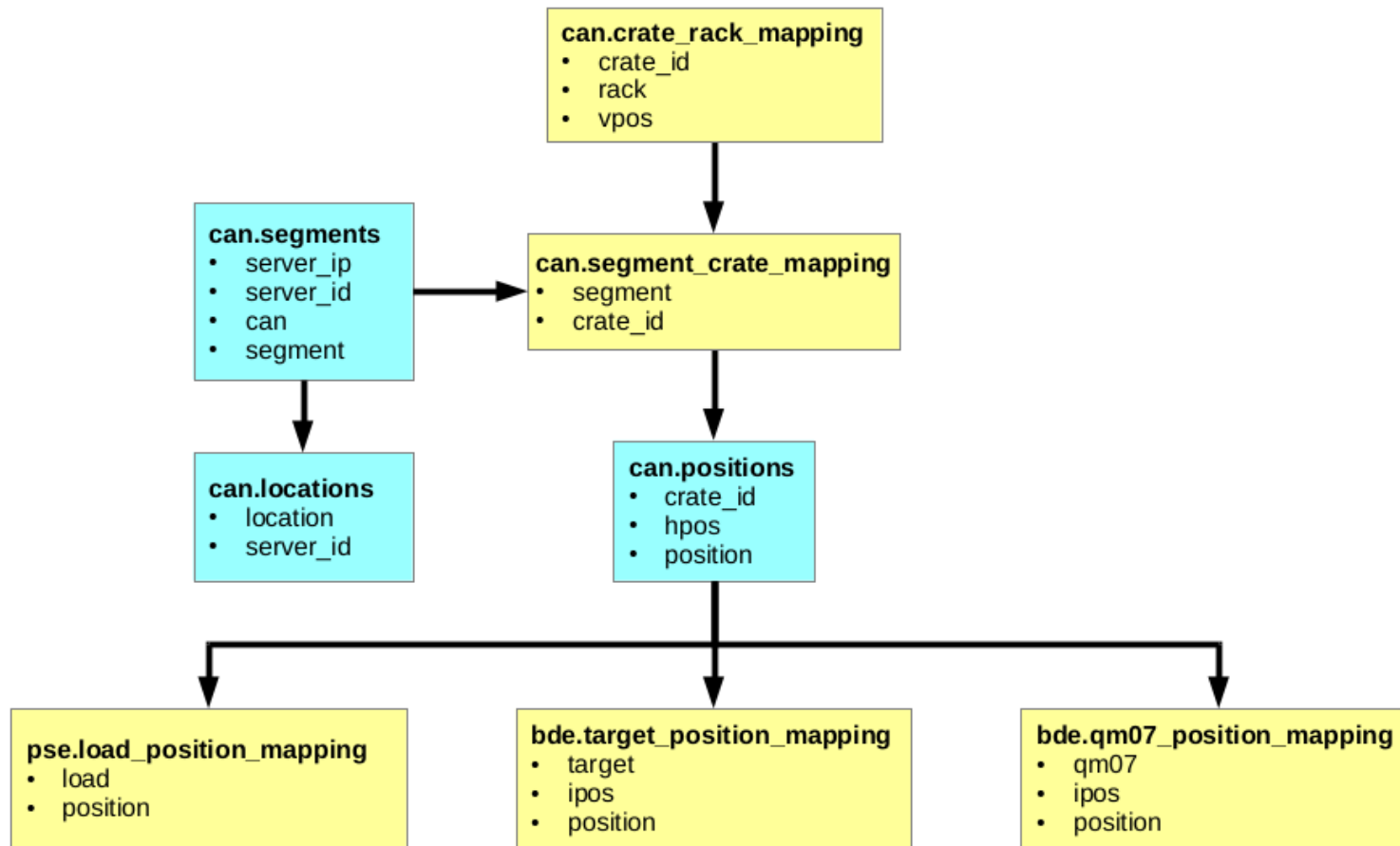


Abbildung 6.1.: Übersicht über die vorgeschlagenen Änderungen an der relationalen Datenbank zur Abbildung der CPS-Netzteile, der Target-Controller, sowie der qm07-Messelektronik. Die Gemeinsamkeit über den gleichen Bus angesteuert zu werden, sowie die gleiche Bauform der Rahmen für diese drei Typen von Elektronik begründen die Zusammenführung der Einbauposition in einer gemeinsamen Tabelle. Die darüber liegenden Tabellen und Relationen bilden im linken Teil des Bildes die Server ab, auf denen die IOCs laufen, die obere Tabelle bildet den Anschluss an die Tabelle zum physischen Standort der Hardware.



Teil II.

Automatisierte Optimierung der Strahlführung



7 Einleitung

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit behandelt die automatisierte Optimierung, die auf der in Teil I vorgestellten Migration aufbaut.

Die experimentelle Kernphysik verwendet unter anderem Beschleuniger und Spektrometer als Messinstrumente. Um Kenntnisse über Eigenschaften von Atomkernen zu gewinnen, werden am S-DALINAC Elektronen beschleunigt und auf ein Target des zu untersuchenden Materials geschossen. Zur Analyse stehen verschiedene Spektrometer für Elektronensteuerung und Kernresonanz-Fluoreszenz zur Verfügung. Der Beschleuniger ist in einem Energiebereich von 2 MeV bis 130 MeV einstellbar, wobei die zu liefernde Energie vom Experiment vorgegeben wird. Zu den Vorgaben des Experiments zählen außerdem Strahlstrom, Fokussierung und Position auf dem Target, sowie die Toleranzen der einzelnen Größen.

Zur Vorbereitung des Experiments gehört auf Seite des Beschleunigers, die geforderten Bedingungen zu realisieren. Dazu müssen unter anderem alle Magnete der Strahlführung eingestellt und justiert¹ werden. Für die etwa 200 m lange Strahlführung von der thermionischen Quelle bis zum Lintott Spektrometer sind dazu über 200 einzelne Magnete einzustellen. Um den Zeitaufwand zu reduzieren, der benötigt wird, den Beschleuniger in einen Zustand zu bringen, der die Anforderungen des Experiments an den Elektronenstrahl erfüllt, werden Werkzeuge, wie EScORe zum Laden von Zuständen des Beschleunigers oder Strahlsimulationen eingesetzt. Wie die Erfahrung vergangener Einstellarbeiten zu Beginn einer Strahlzeit zeigt, ist es sinnvoll, zunächst den Elektronenstrahl bis zum Target zu bringen, unabhängig von der Qualität des Strahls am Target. Von diesem Zustand aus werden dann alle Magnete der Strahlführung nochmals einzeln, beginnend bei der Elektronenquelle, justiert. Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt. Kann der Strahl nicht in den geforderten Toleranzen am Experiment abgeliefert werden, wird eine andere Einstellung gesucht, für die dann ebenfalls jeder Magnet justiert werden muss.

Eine *automatisierte Optimierung* soll diesen Vorgang beschleunigen und erleichtern. Dazu soll für jeden Magneten eine optimale Einstellung bezüglich der geforderten Randbedingungen ermittelt und eingestellt werden. Bislang muss diese Einstellung manuell vorgenommen werden.

7.1 Einstellung der Ablenkfreiheit für Quadrupolmagnete

Die Justage der Magnete der Strahlführung umfasst die ablenkfreie Einstellung von Quadrupolmagneten, die hier im Detail behandelt wird, aber nicht die einzige Aufgabe des Operators während der vorbereitenden Einstellungen für ein Experiment darstellt.

Um einen Quadrupolmagnet in eine ablenkfreie Einstellung zu bringen, wird der Strahl auf einem Leuchtschirm beobachtet. Bewegt sich der Schwerpunkt dieses Strahlflecks bei einer Veränderung eines davor liegenden Quadrupolmagnets, wird an einem Korrekturdipolmagnet, der vor dem Quadrupolmagnet liegt, der Strom so verändert, dass der Strahl auf einer leicht verschobenen Bahn in den Quadrupolmagnet eintritt. Erneut wird der Strom des Quadrupolmagnets über

¹ Der Stromwert des Magneten wird geändert, um die Eigenschaften des Elektronenstrahls zu verbessern. Dieser Vorgang wird in diesem Kapitel als *justieren* bezeichnet.

einen weiten Bereich verändert. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Änderung des Stroms des Quadrupolmagnets nicht länger Änderungen der Position des Schwerpunkts des Strahlflecks verursacht. Damit ist der Korrekturdipolmagnet so eingestellt, dass für den Quadrupolmagnet Ablenkfreiheit erreicht ist.

Für jeden Quadrupolmagnet wird dieser Vorgang sowohl in horizontaler, als auch in vertikaler Richtung durchgeführt. Diese Arbeit ist sehr zeitaufwändig und für den durchführenden Operateur ermüdend. Diese Arbeit stellt die Entwicklung und Implementierung einer automatisierten Optimierung am S-DALINAC vor. Am Beispiel eines Quadrupolmagnets, der ablenkfrei eingestellt wurde, demonstriert die automatisierte Optimierung die Funktionsfähigkeit.

8 Strahloptik

In diesem Kapitel zur Strahloptik wird der Begriff der Sollteilchenbahn vorgestellt und auf die Eigenschaften von Korrekturdipolmagneten und Quadrupolmagneten eingegangen. Dies ermöglicht die Formulierung einer Funktion, mit der die Position des Schwerpunkts des Strahls auf einem Leuchtschirm in Abhängigkeit der Stromstärken durch die beteiligten Magnete angegeben werden kann.

Analog zur geometrischen Optik des Lichts wird bei Beschleunigeranlagen von der *Strahloptik* gesprochen, um die physikalischen Grundlagen zur Strahlführung zu bezeichnen [62]. Hierbei wird eine sogenannte Sollteilchenbahn angenommen, die aus der Planung der Beschleunigeranlage resultiert [4]. Diese wird für Simulationen und die Ausrichtung der Geräte am Beschleuniger herangezogen.

8.1 Sollteilchenbahn

Die Koordinaten der Teilchen in einem Beschleuniger sind, wie in Abb. 8.1 gezeigt, durch ein mitbewegtes Koordinatensystem gegeben, wobei s in Strahlrichtung, x in die horizontale Ebene und y in die Vertikale weist. Idealisiert werden *Sollteilchen* als Punktteilchen ohne Ausdehnung angenommen, die sich exakt auf der Sollteilchenbahn bewegen und damit den Ursprung des mitbewegten Koordinatensystems bilden. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Beschreibung in der s - x -Ebene, da für die s - y -Ebene entsprechende Ausdrücke gelten. Die Strahlführung des S-DALINAC liegt nur in horizontaler Ebene¹.

Im Allgemeinen weisen die Teilchen eines Strahls eine gewisse Winkeldivergenz auf. Es ist also notwendig den Strahl zu fokussieren. Außerdem muss der Strahl auf eine gekrümmte Bahn gelenkt werden, um ihn auf der vorgegebenen Sollbahn zu halten. Am S-DALINAC können die x - und y -Koordinaten des Strahls durch Leuchtschirme bestimmt werden. Ein Teilchen wird dabei durch den sechsdimensionalen Vektor \vec{r} repräsentiert:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ c\tau \\ \frac{\Delta p}{p_0} \end{pmatrix}. \quad (8.1)$$

In Gl. (8.1) stehen x und y für die jeweiligen Koordinaten, x' und y' beschreiben die Divergenz, also die Winkelabweichung zur Sollbahn, $c\tau$ beinhaltet den longitudinalen Abstand und $\frac{\Delta p}{p_0}$ die Impulsabweichung zum Sollteilchen.

¹ Der in Abb. 2.1 lila hinterlegte Bereich der polarisierten Quelle liegt in der s - y -Ebene, ist jedoch für diese Arbeit ohne Belang.

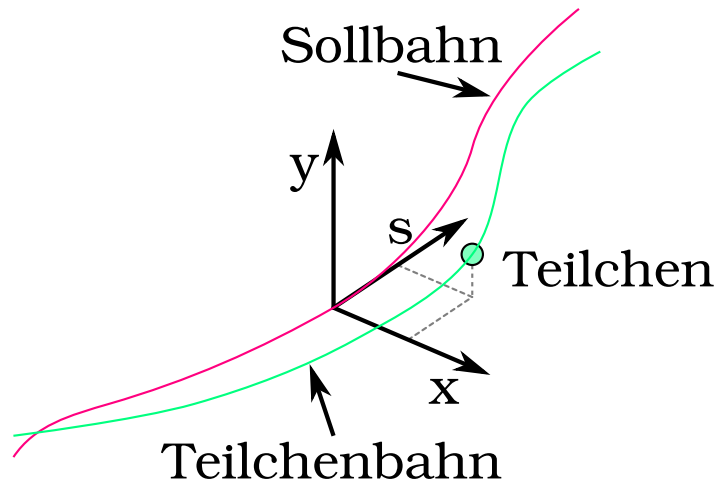


Abbildung 8.1.: Auf der rot dargestellten Sollbahn bewegt sich das Koordinatensystem entlang der s -Achse. Das auf der grün dargestellten Bahn laufende Teilchen hat eine horizontale Ablage in x , eine vertikale Ablage in y und eine longitudinale Ablage in s .

Propagieren die Teilchen frei, also ohne den Einfluss von Magnetfeldern, über eine gewisse Strecke, liegt eine *Driftstrecke* vor, die im Matrixformalismus der linearen Strahloptik für die Darstellung wie in Gl. (8.2) aufgeführt, hat.

$$R_{\text{Drift}} = \begin{pmatrix} 1 & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Dabei beschreibt l die Länge der Driftstrecke in Richtung des Strahls. Eine Multiplikation der Matrix R_{Drift} an den sechsdimensionalen Vektor des Phasenraums \vec{r} liefert Koordinaten des Teilchens nach der Driftstrecke.

8.2 Magnete

Mit der Lorentzkraft $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ wird die Kraft \vec{F} beschrieben, die auf ein Elektron e mit der Geschwindigkeit \vec{v} im elektrischen \vec{E} Feld und im magnetischen Feld \vec{B} wirken. Bewegen sich Teilchen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit, wirkt auf diese Teilchen in Näherung die gleiche Kraft, wenn $\vec{E} = c\vec{B}$ gilt. Dabei wäre ein 1 T starker Magnet äquivalent zu einem elektrischen Feld von $3 \cdot 10^8$ V/m. Während Magnete dieser Stärke allgemein verfügbar sind, sind elektrische Felder bei einigen zehn MV schon nicht mehr realisierbar. Aus diesem Grund werden an Beschleunigern überwiegend Magnete zur Strahlführung und Fokussierung eingesetzt.

Das typische Bild der Form eines Beschleunigers, wie Abb. 2.1, wird durch große Dipolmagnete geprägt. Diese Dipolmagnete lenken den Strahl am S-DALINAC typischerweise um 30° bis 60° ab und bestimmen das Bild der Bögen der Strahlführung am Beschleuniger. In der vorliegenden Arbeit werden diese Dipolmagnete nicht betrachtet. Korrekturdipolmagnete sind kleine

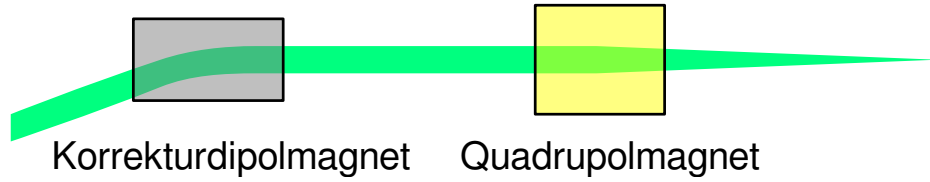


Abbildung 8.2.: Korrekturdipolmagnete korrigieren die Richtung des Strahls um einige Zentimeter pro Meter. Quadrupolmagnete fokussieren den Strahl in einer Ebene, während sie in der anderen Ebene defokussierend wirken.

Dipolmagnete und lenken den Strahl um einige Zentimeter pro Meter ab. Damit begründet sich die Kleinwinkelnäherung zur Berechnung von Teilchenbahnen im Beschleuniger. Für kleine x wird dabei $\sin(x) = x$ und $\cos(x) = 1$ gesetzt. Dies entspricht dem ersten Term einer Taylorreihenentwicklung der jeweiligen trigonometrischen Funktion.

8.3 Korrekturdipolmagnete

Korrekturdipolmagnete werden zur Korrektur der Richtung des Elektronenstrahls eingesetzt, wie in Abb. 8.2 skizziert. Sie bestehen aus zwei sich gegenüberliegenden Spulen durch die ein Strom fließt, so dass ein homogenes Magnetfeld entsteht. Der Stromfluss I_K durch diese Spulen ist proportional zum induzierten Magnetfeld B . Durch die Lorentzkraft wirkt das Magnetfeld B proportional als Kraft F auf die Elektronen. Die Kraft F ist proportional zu $1/R$, dem inversen Radius, auf den die Elektronen im Einflussbereich des Korrekturdipolmagnets gezwungen werden. Damit gilt

$$I_K = k_1 \cdot \frac{1}{R} \quad (8.3)$$

mit der durch die Bauweise bestimmten Konstante k_1 , in die unter anderem Größen wie die Windungszahl, Spulenabstand, magnetische Steifigkeit und die magnetische Feldkonstante μ_0 eingehen.

Aus der in Abb. 8.3 skizzierten geometrischen Überlegung heraus wird die Abhängigkeit des Ausfallswinkels x'_2 des Strahls vom Einfallswinkel x'_1 , dem Radius R der Elektronen und der Länge L , die der Korrekturdipolmagnet auf die Elektronen wirkt, entwickelt. Aus den Gleichungen

$$\sin(x'_1) = \frac{l_1}{R} \quad (8.4)$$

$$\sin(x'_2) = \frac{l_2}{R} \quad (8.5)$$

ergibt sich mit

$$L = l_1 + l_2 \quad (8.6)$$

die Gleichung

$$L = R \sin(x'_1) + R \sin(x'_2). \quad (8.7)$$

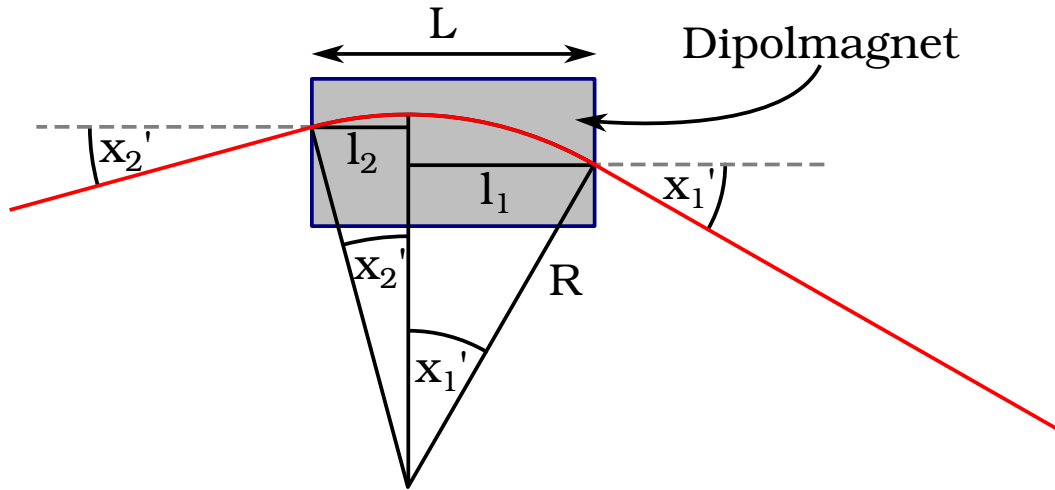


Abbildung 8.3.: Unter dem Einfallswinkel x'_1 fällt der rot dargestellte Elektronenstrahl in den Korrekturdipolmagnet ein und wird von diesem abgelenkt. Er verlässt den Magneten unter dem Winkel x'_2 . Die Länge des Magneten ist mit $L = l_1 + l_2$ gekennzeichnet. Das Magnetfeld zwingt die Elektronen auf eine Kreisbahn mit dem Radius R .

Auflösen nach x'_2 ergibt

$$x'_2 = \arcsin\left(\frac{L}{R} - \sin(x'_1)\right). \quad (8.8)$$

Eine Kleinwinkelnäherung, für die $\sin(x) = x$ gilt, führt damit zu

$$x'_2 = \frac{L}{R} - x'_1 \quad (8.9)$$

womit der Ausfallswinkel des Strahls aus dem Korrekturdipolmagnet nur noch von der variablen Größe des Stroms I_K und von den vorgegebenen Größen L und x'_1 sowie einer Konstanten k_1 abhängt. Dabei wird I_K als variabel angesehen, da dieser Wert zur Strahlzeit geändert werden kann. Dem gegenüber stehen feste Größen wie der Länge einer Driftstrecke, deren Änderung einen Umbau erfordern würde, aber auch Einfallswinkel und Einfallskoordinate des Elektronenstrahls werden als fest angenommen, da diese Größen vom betreffenden Magnet nicht beeinflusst werden können.

Den Einfluss des Eintrittswinkels auf die Austrittsposition soll mit Abb. 8.4 erklärt werden. Mit

$$R = b + c \quad \text{und} \quad c = R \cos(x_1) \quad (8.10)$$

ergibt sich

$$R = b + R \cos(x_1) \quad (8.11)$$

$$b = R(1 - \cos(x_1)) \quad (8.12)$$

Außerdem gilt

$$\tan(x_1) = \frac{a + b}{l_1} \quad (8.13)$$

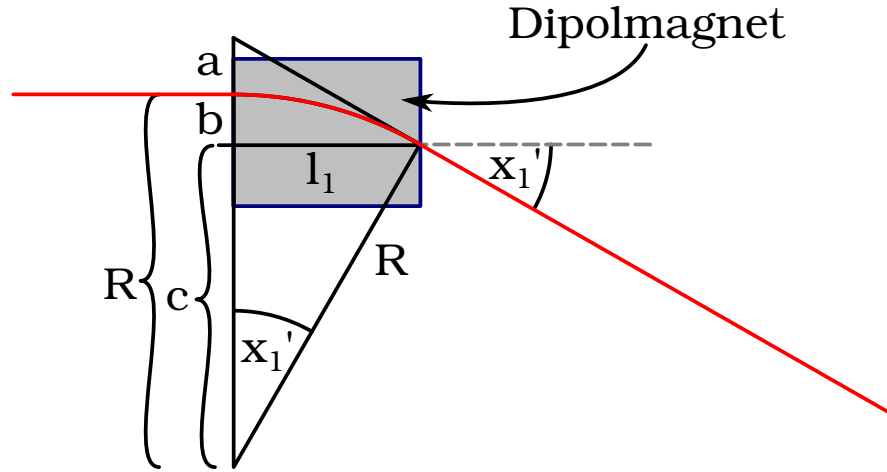


Abbildung 8.4.: Unter dem Einfallswinkel x'_1 fällt der rot dargestellte Elektronenstrahl in den Korrekturdipolmagnet ein und wird von diesem abgelenkt und auf eine Kreisbahn mit dem Radius R gezwungen. Um die Strecke a ändert sich die Austrittsposition gegenüber einer feldfreien Driftstrecke.

also

$$a = l_1 \tan(x_1) - b \quad (8.14)$$

mit Gl. 8.12 ergibt das

$$a = l_1 \tan(x_1) - R(1 - \cos(x_1)) \quad (8.15)$$

Eine Kleinwinkelnäherung führt zu

$$a = l_1 x_1 \quad (8.16)$$

was einer Driftstrecke entspricht. Für kleine Winkel darf demnach die Krümmung der Bahn zur Berechnung der Austrittsposition vernachlässigt werden.

Um die Position des Elektronenstrahls auf einem Leuchtschirm hinter dem Korrekturdipolmagnet und Driftstrecke in linearer Abhängigkeit vom Strom des Magneten in Anlehnung an die Matrixschreibweise darzustellen, wird Gl. 8.3 in Gl. 8.9 eingesetzt um x'_2 zu beschreiben. Für x_2 wird auf Gl. 8.16 zurück gegriffen. Daraus ergibt sich hinter dem Korrekturdipolmagnet der Vektor

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + l_1 x'_1 \\ l_1 k_1 I_K - x_1 \end{pmatrix} \quad (8.17)$$

worin nur noch I_K als Variable bezüglich des Korrekturdipolmagnets enthalten ist.

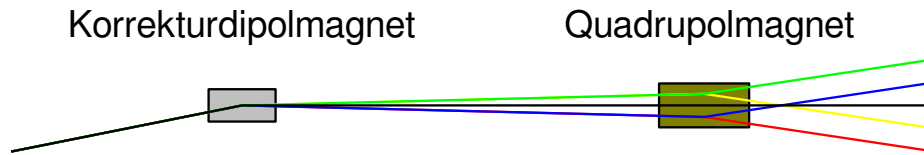


Abbildung 8.5.: Je nach Ablenkung im Korrekturdipolmagnet trifft der Strahl mit unterschiedlichen Ablängen (farbig) zur Sollachse (schwarz) in den Quadrupolmagnet ein. Der Strahl wird im Quadrupolmagnet fokussiert und je nach Polarität und Ablage abgelenkt. Durchläuft der Strahl den Quadrupolmagnet mittig, wird der Strahl von diesem nicht abgelenkt und es liegt eine ablenkfreie Einstellung vor.

8.3.1 Matrixschreibweise von Dipolmagneten

Da ein Sektormagnet, der durch

$$R_{\text{Dipol}} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{L}{R}) & R \sin(\frac{L}{R}) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R} \sin(\frac{L}{R}) & \cos(\frac{L}{R}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.18)$$

beschrieben werden kann, für parallele Strahlen eine unterschiedliche magnetische Länge aufweist, repräsentiert der Term in der ersten Spalte und zweiten Zeile von Gl. (8.18) die Abhängigkeit des Austrittswinkels vom Eintrittsort. Korrekturdipolmagnete hingegen sind Recheckmagnete, deren Matrixdarstellung ohne Hinzunahme von Kantenwinkeln zu derjenigen einer Driftstrecke führt [4]. Daher kann keine dieser beiden Formeln für Korrekturdipolmagnete verwendet werden.

8.4 Quadrupolmagnete

Quadrupolmagnete werden zur Strahlfokussierung eingesetzt, wie in Abb. 8.2 skizziert. Form und Anordnung der vier Pole eines Quadrupolmagnets sind so gewählt, dass im Inneren ein Magnetfeld entsteht, dass proportional zum transversalen Abstand zur s-Achse stärker wird. Quadrupolmagnete, die in horizontaler Ebene eine fokussierende Wirkung aufweisen (Gl. (8.19)), wirken in vertikaler Ebene defokussierend und umgekehrt (Gl. (8.20)). Die Anordnung aus fokussierendem Quadrupolmagnet, Driftstrecke, defokussierendem Quadrupolmagnet und einer weiteren Driftstrecke wird als FODO-Zelle bezeichnet. Durch diese Anordnung kann eine für beide Achsen fokussierende Wirkung erreicht werden. Eine Ablenkung des gesamten Strahls, wie in Abb. 8.5 durch farbigen Strahlverlauf dargestellt, soll beim Einsatz eines Quadrupolmagnets vermieden werden, da die Fokussierung des Strahls unabhängig zur Position des Schwerpunkts sein soll.

8.4.1 Transformationsmatrizen

Aus der vollständigen Beschreibung der Matrizen der Quadrupolmagnete

$$R_{\text{Quadr., fok.}} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & \frac{\sin \Omega}{\sqrt{|k|}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh \Omega & \frac{\sinh \Omega}{\sqrt{|k|}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.19)$$

für fokussierende und

$$R_{\text{Quadr., defok.}} = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & \frac{\sinh \Omega}{\sqrt{|k|}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Omega & \frac{\sin \Omega}{\sqrt{|k|}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.20)$$

für defokussierende Quadrupolmagnete mit $\Omega = L\sqrt{|k|}$, wobei k die Quadrupolstärke und L die magnetische Länge des Quadrupolmagneten darstellen, kann die Wirkung bezüglich der x -Achse angegeben werden als

$$R_{\text{Quadr., fok.}} = \begin{pmatrix} \cos(L\sqrt{|k|}) & \frac{\sin(L\sqrt{|k|})}{\sqrt{|k|}} \\ -\sqrt{|k|} \sin(L\sqrt{|k|}) & \cos(L\sqrt{|k|}) \end{pmatrix}, \quad (8.21)$$

wobei die Stromstärke I_Q , des durch den Quadrupolmagneten fließenden Stroms in der Quadrupolfeldstärke k enthalten ist. Mit einer Kleinwinkelnäherung für die sinusartigen Terme und eine Taylorentwicklung bis zum zweiten Summand für die cosinusartigen Terme, sowie der linearen Abhängigkeit zwischen der Quadrupolfeldstärke k und dem Strom I_Q durch den Quadrupolmagneten mit $k = k_2 I_Q$ ergibt sich daraus²

$$R_{\text{Quadr., fok.}} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2} L^2 k_2 I_Q & L \\ -k_2 I_Q L & \frac{1}{2} L^2 k_2 I_Q \end{pmatrix}, \quad (8.22)$$

8.5 Bewertungsfunktion

Um nun auf einem Leuchtschirm die Wirkung auf einen Teilchenstrahl zu betrachten, der einen Korrekturdipolmagnet, eine Driftstrecke, den Quadrupolmagneten und eine weitere Driftstrecke passiert hat, müssen die Matrizen dieser Elemente multipliziert werden.

² In k_2 gehen analog zu k_1 unter anderem die geometrischen Größen ein.

Mit Gl. 8.17, einer reduzierten Darstellung von Gl. 8.2 und Gl. 8.22 ergibt sich damit

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}L^2k_2I_Q & L \\ -k_2I_QL & \frac{1}{2}L^2k_2I_Q \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 + l_1x'_1 \\ l_1k_1I_K - x_1 \end{pmatrix}. \quad (8.23)$$

mit

- x_2 Horizontale Position des Strahls auf dem Leuchtschirm
- x'_2 Horizontale Winkelabweichung des Strahls auf dem Leuchtschirm
- I_K Strom durch den Korrekturdipolmagnet
- I_Q Strom durch den Quadrupolmagnet
- k_1 Eigenschaften des Korrekturdipolmagnet
- k_2 Eigenschaften des Quadrupolmagnet
- l_1 Magnetische Länge des Korrekturdipolmagnet
- l_2 Länge der Driftstrecke zwischen Korrekturdipolmagnet und Quadrupolmagnet
- L Magnetische Länge des Quadrupolmagnet
- l_4 Länge der Driftstrecke zwischen Quadrupolmagnet und Leuchtschirm

Die Lösung dieser Gleichung ergibt einen unübersichtlichen Ausdruck. Zusammenfassen der Vorfaktoren der Ströme als Konstanten führt zu Gl. 8.24. Daraus ergibt sich für x_2 eine lineare Abhängigkeit von den Strömen I_K und I_Q . Da vom Kontrollsystem nur die Größen I_K und I_Q verändert werden können, gelten alle anderen Größen als konstant. Somit lautet die Bewertungsfunktion³ in einer übersichtlichen mathematischen Darstellung

$$F(I_K, I_Q) = aI_K + bI_Q + cI_KI_Q + d, \quad (8.24)$$

wobei F in diesem Fall für x_2 steht, der horizontalen Koordinate auf dem Leuchtschirm. In den Konstanten a , b , c und d sind sämtliche übrigen Eigenschaften enthalten, die unter anderem auf die Geometrie, Bauweise, Anordnung oder Naturkonstanten zurückzuführen sind. Die Bewertungsfunktion und die weiter unten vorgestellte automatisierte Optimierung sind nicht auf die Einstellung ablenkfreier Quadrupole begrenzt, so hat die Bewertungsfunktion im Allgemeinen für unterschiedliche Anwendungen eine unterschiedliche Form.

Mit dieser Bewertungsfunktion können nun Aussagen über die ablenkende Wirkung eines Quadrupolmagnets getroffen werden.

Der gesuchte Wert für I_K , bei dem die Bewertungsfunktion für alle Werte des Stroms I_Q durch den Quadrupolmagnet den gleichen Wert annimmt, kann durch

$$0 = \frac{dF(I_K, I_Q)}{dI_Q} = b + cI_K \quad (8.25)$$

ermittelt werden. Sind die Parameter bekannt, liegt eine ablenkfreie Einstellung des Quadrupolmagnets bei

$$I_K = \frac{-b}{c} \quad (8.26)$$

vor.

³ Der Begriff der Bewertungsfunktion stammt aus [63]

Angemerkt sei hier zur Vollständigkeit, dass die in Kap. 10 vorgestellte Methode entwickelt wurde, um einen Quadrupolmagnet ablenkfrei einzustellen, unabhängig davon, ob der Elektronenstrahl mittig und auf der Sollachse und in welchem Winkel dieser durch diesen Magneten läuft. Untersucht wurde die Ablenkung, nicht die Position oder Winkel des Strahls zur Sollachse im Magneten.



9 Instrumente

Dieses Kapitel listet die Instrumente auf, die eine automatisierte Optimierung nutzt. Neben der Hardware wird auch auf die Software eingegangen.

9.1 Bilderzeugung

Das wichtigste Diagnoseinstrument zur Strahleinstellung ist das bildgebende System aus Kamera und Leuchtschirm.

Die Position des Elektronenstrahls wird auf mit Gold bedampften Leuchtschirmen aus Beryllium-Oxid sichtbar. Diese Leuchtschirme, mit einem Durchmesser von 2,5 cm, sind in den Strahlverlauf fahrbar und werden durch ein Fenster von einer Kamera erfasst. Sie stehen in einem Winkel von 45° sowohl zur Strahlachse, als auch zur Kamera-Achse, um Verzerrungen der Abbildung zu reduzieren. Abbildung 9.1 zeigt das Bild des Leuchtschirms *IOT2*.

Kameras nehmen Bilder der Leuchtschirme auf. Dazu werden am S-DALINAC kostengünstige CCD- und CMOS-Kameras eingesetzt. Je nach Strahlenbelastung, der die Kamera ausgesetzt ist, muss diese nach gewisser Zeit ersetzt werden. Kameras am Experimentierplatz DHIPS können dabei schon nach einigen Wochen unbrauchbar werden, an Orten mit geringer Strahlenbelastung ist eine Betriebsdauer von einigen Jahren durchaus üblich. Durch die Strahlenbelastung nimmt allmählich die Anzahl der defekten Pixel einer Kamera zu. Diese Defekte äußern sich durch konstant weiße oder schwarze Pixel.

Der im Rahmen dieser Arbeit installierte Digitalisierer¹ verfügt über acht analoge Videoeingänge und stellt diese digitalisiert im Netzwerk bereit. Dabei werden mehrere Formate unterstützt, die auf Linux und Windows Betriebssystemen ausgelesen werden können.

9.2 Digitalisierung der Bilddaten

Die eigentliche Digitalisierung der Bilddaten zu EPICS-kompatiblen PVs leistet die Software *AreaDetector*[64, 65]. Der IOC, der diese Software verwendet liest digitale Bilddaten ein und berechnet daraus verschiedene Eigenschaften, die als PV abrufbar vorgehalten werden. Dadurch werden die Koordinaten des Strahlschwerpunktes als PV zugänglich. Ein im Rahmen dieser Arbeit erstelltes Skript konfiguriert den *AreaDetector*-IOC und passt diesen an die Gegebenheiten am S-DALINAC an. Die Daten dieser Arbeit wurden durch Nutzung der Version 1.9.1 der *AreaDetector*-Software aufgenommen.

Dabei arbeitet der *AreaDetector* modularisiert. Verschiedene Module übernehmen verschiedene Aufgaben und sind untereinander verbunden, wie in Abb. 9.2 skizziert. So wird im Modul *URLDriver* die URL des Digitalisierers hinterlegt. Die Daten werden an das Modul *ROI* weitergeleitet, in dem der Bildausschnitt des Leuchtschirms definiert wird. Das Modul *NDStats* berechnet daraus die Koordinaten des Schwerpunkts des Strahls und stellt verschiedene Einstellmöglich-

¹ Es wird ein Digitalisierer des Typs Vivotek VS8801 eingesetzt

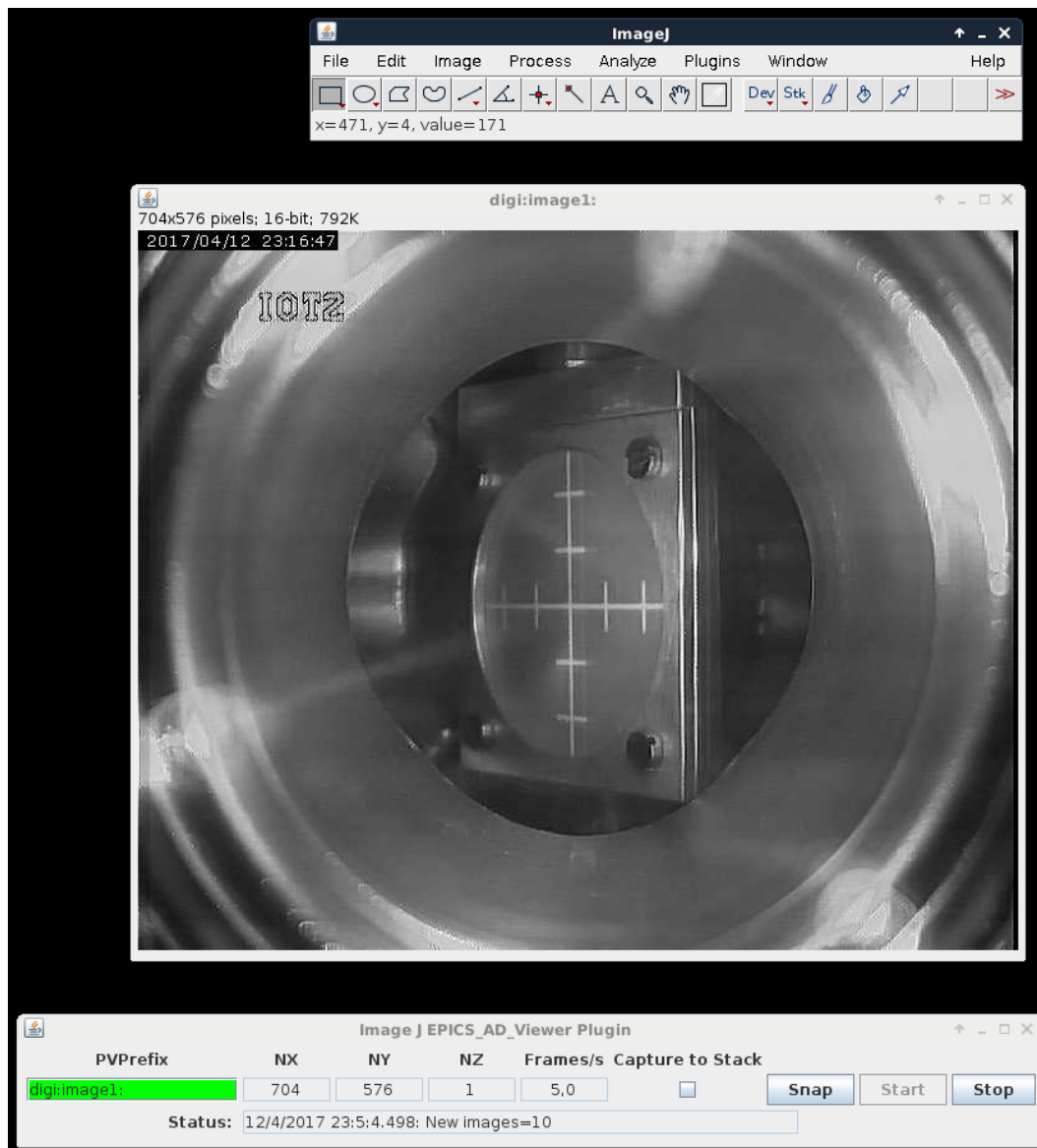


Abbildung 9.1.: Die AreaDetector-Software kann über *ImageJ* und das Plugin *ImageJ EPICS AD Viewer* Bilder anzeigen. Dabei liest ImageJ über PVs die Daten des AreaDetector-IOCs aus.

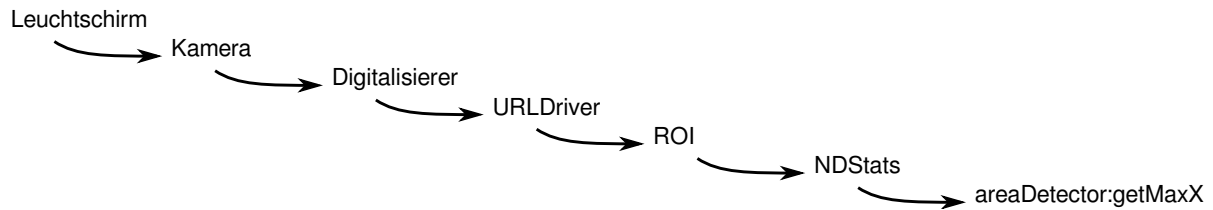


Abbildung 9.2.: Dargestellt ist der Datenfluss vom Leuchtschirm bis zur EPICS-PV *getMaxX*, die den Strahlschwerpunkt in horizontaler Richtung angibt.

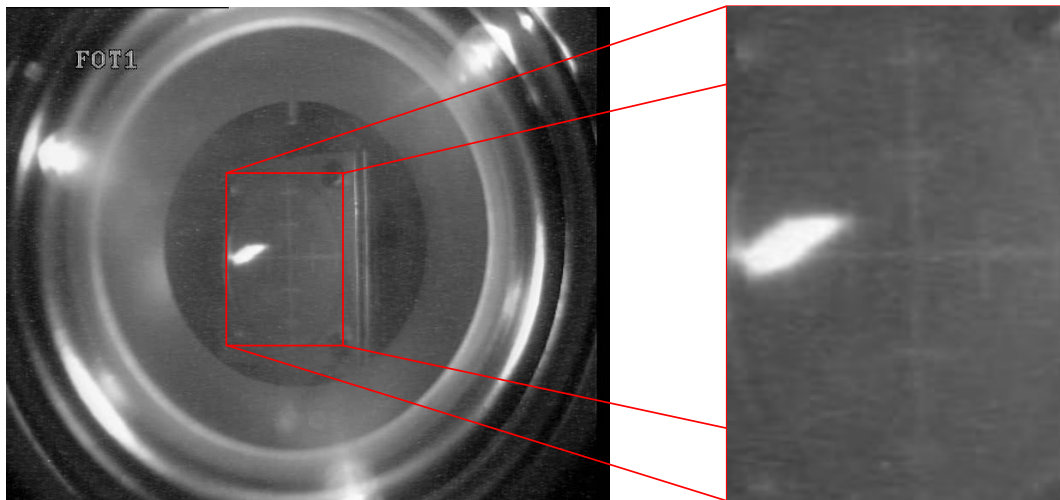


Abbildung 9.3.: Der Leuchtschirm I0F1 mit Strahl. Die Helligkeit der Umgebungsbeleuchtung erreicht ähnliche Werte, wie die Helligkeit des Strahls. Ein Ausschnitt des Bildes, der nur den Leuchtschirm beinhaltet, rot eingezeichnet, behebt dieses Problem.

keiten zur Verfügung. So wurde, um die Hintergrundbeleuchtung zu unterdrücken eine Schwelle der Helligkeit der auszuwertenden Pixel angegeben.

Die digitalisierten Bilddaten sind mit *ImageJ* und einem EPICS-Plugin darstellbar (Abb. 9.1). Zum Vergleich der auftretenden Helligkeiten ist in Abb. 9.3 die Aufnahme eines Leuchtschirms mit Strahl dargestellt. Die Umgebungsbeleuchtung erreicht dabei eine ähnliche Helligkeit, wie die des Strahlflecks. Daraus wird die Relevanz der Wahl des Bildausschnittes deutlich.

Durch Strahlung erzeugte Defekte äußern sich als helle oder dunkle Pixelfehler. Bei der Bildverarbeitung müssen diese Pixelfehler vom Signal des Strahls unterschieden werden. Je mehr Pixel zur Auswertung heran gezogen werden können, desto bessere Ergebnisse sind zu erwarten.



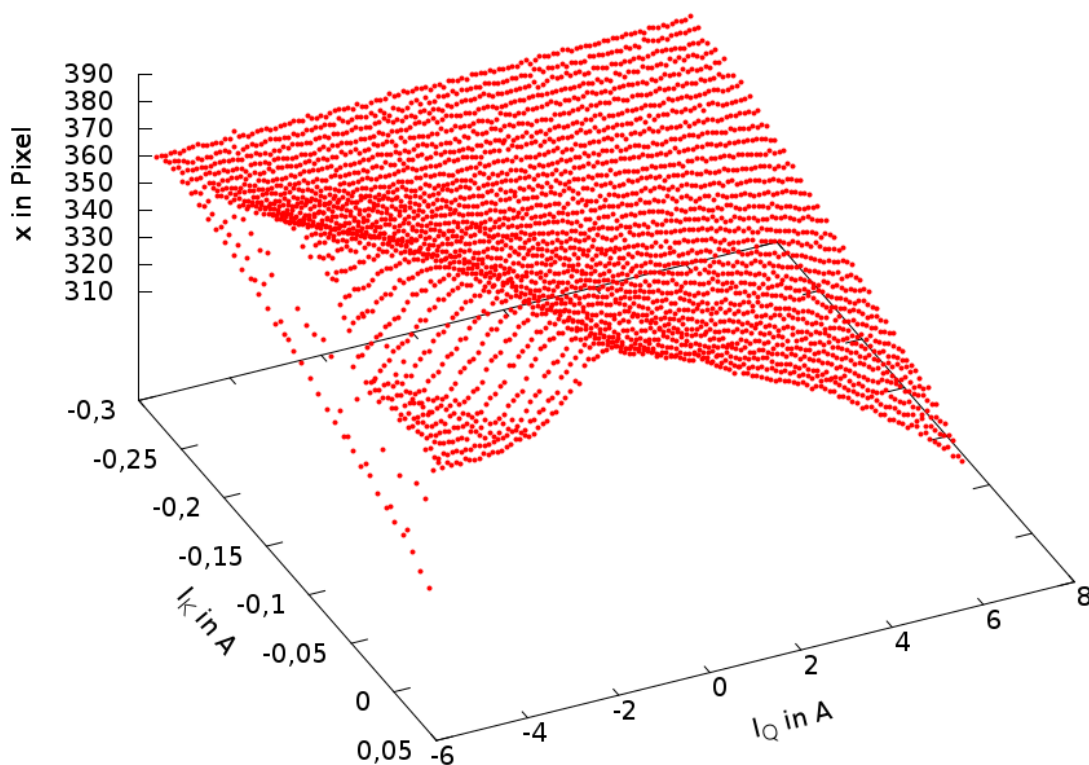


Abbildung 10.2.: Aufgetragen ist der Strom I_K von $I0SH02$ und der Strom I_Q von $I0QU02$ gegen die horizontale Position des Schwerpunkts des Strahls auf $I0T4$.

10.1.1 Instrumente und Einstellungen

Für diese Messung wurden der Korrekturdipolmagnet $I0SH02$, der Quadrupolmagnet $I0QU02$ und der Leuchtschirm $I0T4$, wie in Abb. 10.1 dargestellt, verwendet. In einem *grid search* Verfahren wurde $I0SH02$ von $-0,3$ A bis $0,03$ A mit einer Schrittweite von $0,01$ A eingestellt. Für jeden dieser Ströme wurde $I0QU02$ von $-5,6$ A bis $+6,2$ A mit einer Schrittweite von $0,1$ A eingestellt. Daraus ergaben sich 3894 Datenpunkte, die Messung dauerte etwa 82 Minuten.

10.1.2 Vorstellung der Messergebnisse

Abbildung 10.2 zeigt die mit dieser Messung aufgenommenen Daten. Auffällig ist die abfallende Flanke hin zu einem Plateau im Bereich von 0 A Strom des Dipolmagnets und -6 A Strom des Quadrupolmagnets. Auch die Daten für Quadrupolmagnetströme von -6 A bis -5 A weisen ein näher zu untersuchendes Verhalten auf.

Eine ablenkfreie Einstellung des Quadrupolmagnets $I0QU02$ ist mit einem Dipolmagnetstrom von etwa $-0,27$ A erreichbar, wie aus Abb. 10.3 hervorgeht.

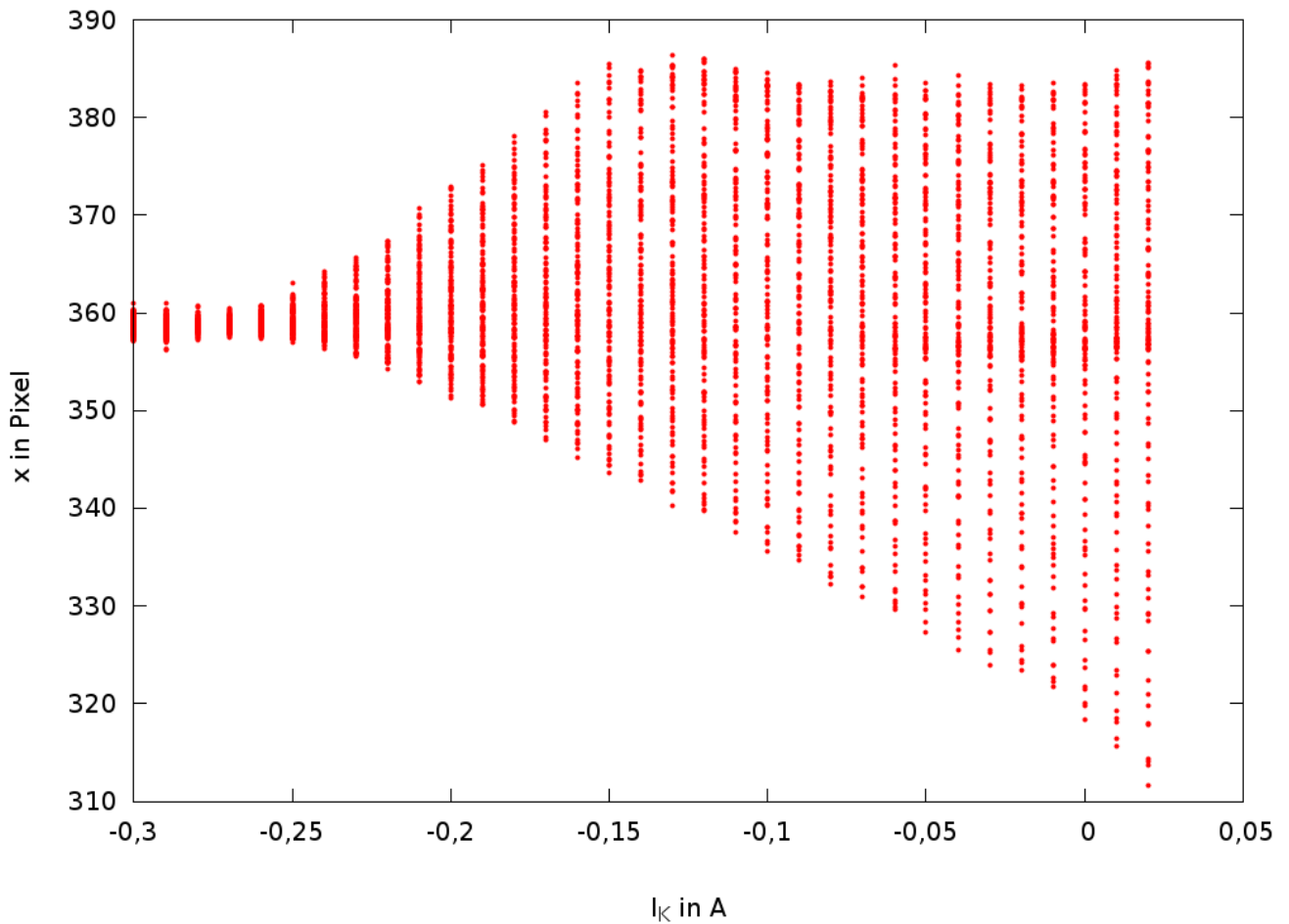


Abbildung 10.3.: Projektion von Abb. 10.2. Daten von Messung 1. Nach rechts ist der Strom des Dipolmagnets I_{OSH02} , nach oben die horizontale Position des Strahls auf dem Leuchtschirm I_{OT4} . Im Bereich zwischen $-0,25$ A und $-0,3$ A für den Strom des Korrekturdipolmagnets liegt eine sehr geringe Ablenkung durch den Quadrupolmagnet I_{QU02} vor, da sich die Position des Schwerpunkts des Strahls nur unwesentlich ändert, bei einer Stromdifferenz von 14 A des Quadrupolmagneten.

10.1.3 Schlussfolgerungen

Wie aus Abb. 10.3 hervorgeht, liegt die ablenkfreie Einstellung des Quadrupolmagnets am Rand der für den Korrekturdipolmagnet aufgenommenen Werte. Die Ursachen der auffälligen Flanke und Plateau wird in Abschnitt 10.2 diskutiert und stammt von Treffern des Elektronenstrahls auf den Rahmen des Leuchtschirms, der nicht beschichtet ist. Damit kann von dort kein Signal aufgenommen werden.

In Abb. 10.4 ist ein Ausschnitt der Daten der ersten Messung für die niedrigsten Quadrupolmagnetströme gezeigt. Daraus wird erkennbar, dass die für $-5,6\text{ A}$ Strom im Quadrupolmagnet aufgenommenen Werte denen von $+6\text{ A}$ entsprechen. Die Daten von $-5,4\text{ A}$ bis $-5,5\text{ A}$ zeigen ein Verhalten, dass die Messdaten gegen diesen Wert streben. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigten, dass die Messpunkte bereits gespeichert wurden, als der geforderte Strom des Quadrupolmagnets von dessen Netzteil noch nicht angelegt war. Daraus folgt, dass die Netzteile der Magnete einige Zeit zum Einstellen eines neuen Stroms benötigen. Eine gesonderte Messung zeigte für das Netzteil von IOQU02 eine Änderungsrate von $3,76\text{ A/s} \pm 0,15\text{ A/s}$. Dieser Effekt muss bei einer automatisierten Optimierung beachtet werden.

10.2 Erkenntnisse zur Weiterentwicklung und Verbesserung

Zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Automatisierung wurde eine weitere Messung durchgeführt. Die Auswahl der für die Messung genutzten Komponenten der Strahloptik orientierte sich am laufenden Betrieb. Die Messungen fanden am 7.12.2016 am S-DALINAC im Injektorbereich statt.

Neben der bereits in der ersten Messung verfolgten Fragestellung sollte die in Kap. 8.5 entwickelte Bewertungsfunktion zur ablenkfreien Einstellung eines Quadrupolmagnets verifiziert werden.

10.2.1 Instrumente und Einstellungen

Für diese Messung wurde der Korrekturdipolmagnet *IOSH03* mit Strömen von -2 A bis $-0,05\text{ A}$ bei einer Schrittweite von $0,03\text{ A}$ eingestellt. Für jeden Strom wurde für *IOQU02* von -7 A bis $+6\text{ A}$ mit $0,5\text{ A}$ Schrittweite je ein Messwert der horizontalen Strahlposition aufgenommen. Daraus ergaben sich 1690 Datenpunkte.

Die Datenpunkte wurden mit einer festen Frequenz aufgenommen, unabhängig davon wie groß die Änderungen des Stroms der Netzteile zwischen zwei Datenpunkten waren. Ein Verhalten welches zeigt, dass der Sollwert des Netzteils des Quadrupolmagnets zum Zeitpunkt der Messung noch nicht den geforderten Wert erreicht hatte, wie dies in der vorangegangenen Messung der Fall war, wurde erwartet.

Die Netzteile erreichen eine Änderungsrate von einigen A/s, was zu unbrauchbaren Daten führt, wenn der Strom in kurzer Zeit über einen weiten Bereich verändert wird. Die Sollwerte springen nach Erreichen des maximalen Stromwerts für die Aufnahme des nächsten Datenpunktes auf den minimalen Wert, was einer Änderungsrate von etwa als 10 A/s entspricht.

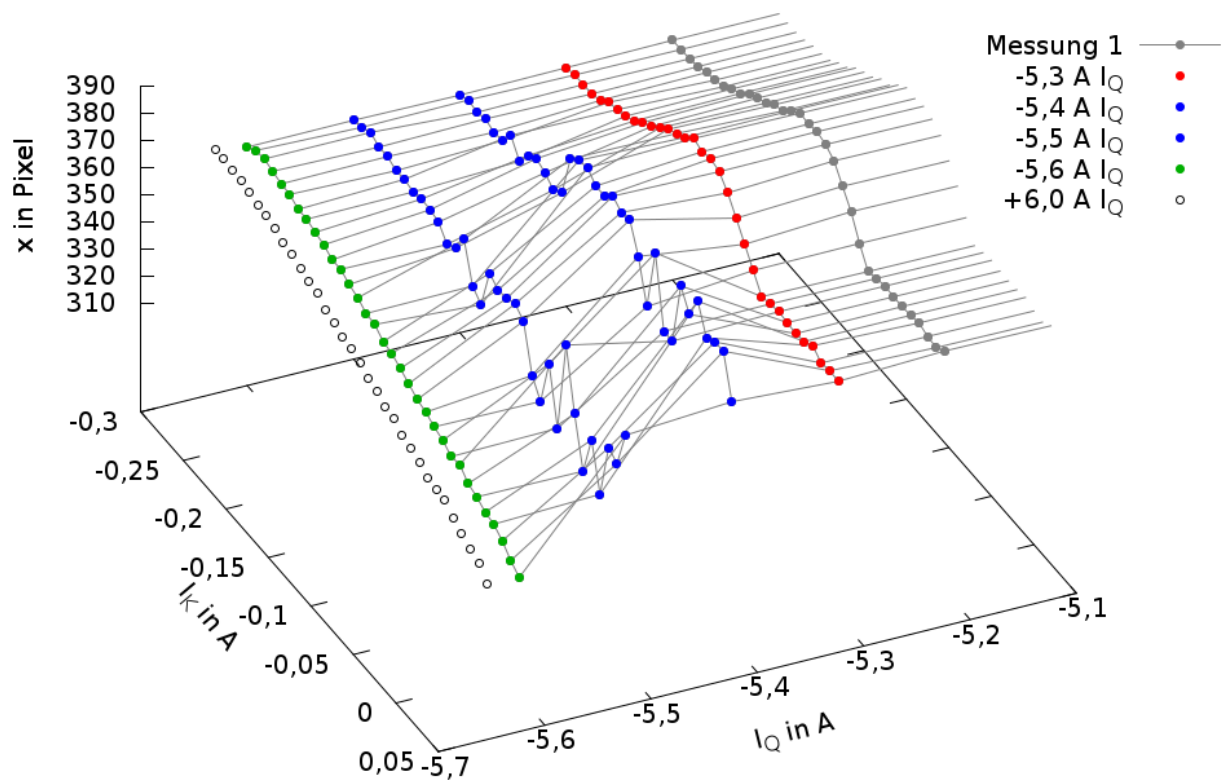


Abbildung 10.4.: Ausschnitt der Messdaten der ersten Messung. Auf der x -Achse, mit I_K bezeichnet, ist der Strom des Korrekturdipolmagnets I0SH02, auf der y -Achse, mit I_Q bezeichnet, ist der Strom des Quadrupolmagnets I0QU02 aufgetragen. In z -Richtung ist die horizontale Position des Strahlschwerpunkts auf dem Leuchtschirm I0T4 abgetragen. Datenpunkte, die mit dem selben Strom durch den Quadrupolmagnet aufgenommen wurden, sind in der selben Farbe dargestellt. In grün ist die Datenreihe für $I_Q = -5,6$ A Strom des Quadrupolmagnets abgebildet. In blau daneben für $I_Q = -5,5$ A und $I_Q = -5,4$ A. Rot markiert ist die Datenreihe für $I_Q = -5,3$ A, die übrigen Daten sind grau dargestellt. Zu Vergleichszwecken ist die mit Kreisen dargestellte Datenreihe für $I_Q = +6,0$ A neben die Datenreihe für $I_Q = -5,6$ A verschoben worden.

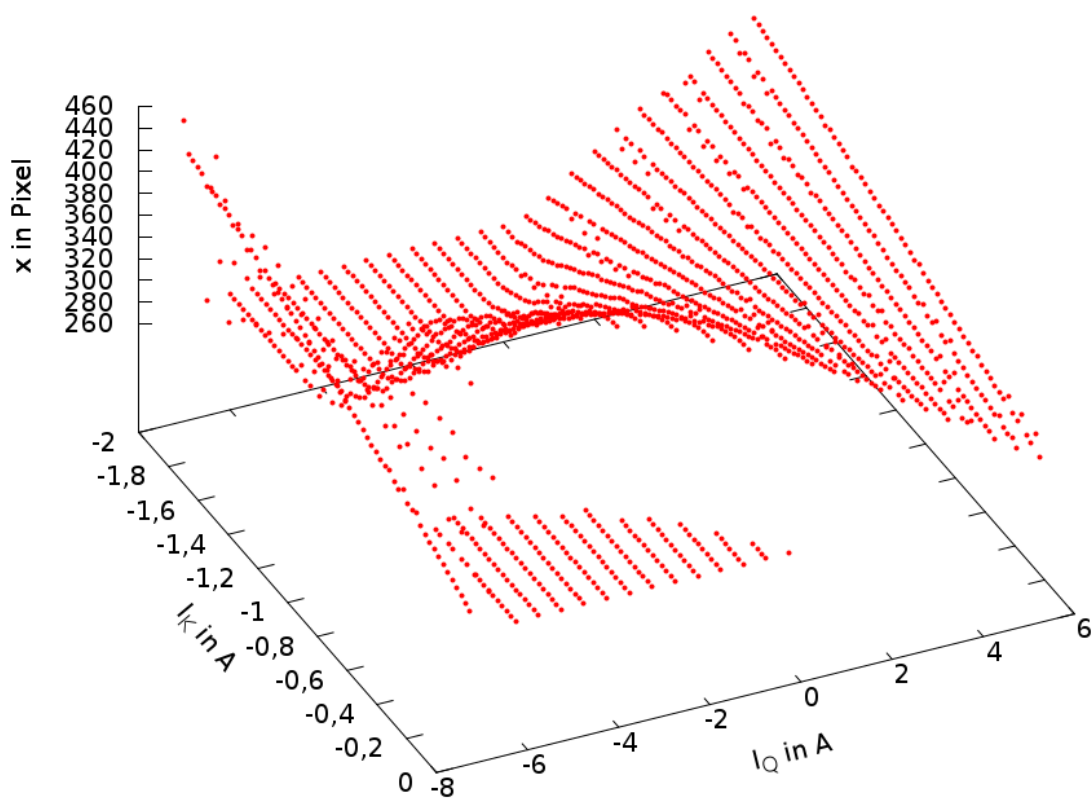


Abbildung 10.5.: Aufgetragen ist der Strom I_K von I0SH03 und der Strom I_Q von I0QU02 gegen die horizontale Position des Schwerpunkts des Strahls auf I0T4. Dargestellt sind die durch die zweite Messung erhobenen Daten.

10.2.2 Messergebnisse

Abbildung 10.5 zeigt die aufgenommenen Daten der oben beschriebenen Messung. Durch einige Anpassungen konnte die Messdauer gegenüber der zuvor vorgestellten Messung auf etwa 30 Minuten reduziert und gleichzeitig bessere Ergebnisse erreicht werden. Für einen Strom von $-1,027\text{ A}$ des Dipolmagnets liegt für den Quadrupolmagnet eine ablenkfreie Einstellung vor. Die Auffälligkeiten der Plateaus für niedrige Quadrupolmagnetströme sind hier ebenfalls vorhanden. Außerdem ist der Effekt der noch nicht erreichter Sollwerte des Stroms des Netzteils in den Datenreihen der niedrigsten Quadrupolmagnetströme zu erkennen.

10.2.3 Schlussfolgerungen

Die Rahmentreffer sind in Abb. 10.6 in schwarz dargestellt. Dabei trifft nicht länger der gesamte Elektronenstrahl auf die Beryllium-Oxid-Schicht des Leuchtschirms, sondern auf den Rahmen, welcher keine Fluoreszenz zeigt. Die verwendete Software setzt in diesem Fall den Wert auf 0 mit einem Offset von 266. Der Offset entsprach der Voreinstellung zur Auswahl des Bereiches des Bildschirms, in dem sich der Leuchtschirm befand.

Abbildung 10.7 zeigt das Verhalten des Netzteils während der Messung. Einige Daten wurden aufgenommen, bevor der angeforderte Strom vom Netzteil des Quadrupolmagnets eingestellt war. Dieses Verhalten wurde auch in der vorangegangenen Messung beobachtet.

In Abb. 10.8 sind Messdaten und die Bewertungsfunktion abgebildet. Zu erkennen ist, dass die Bewertungsfunktion die Messdaten gut beschreiben kann. Mit der Kenntnis der Parameter der Bewertungsfunktion und Gl. 8.26 ist es möglich, den Strom I_K zu identifizieren, für den der Quadrupolmagnet ablenkfrei wird.

Die Problematik der Rahmentreffer führt zu der Notwendigkeit einer sehr sorgfältigen Wahl des zu betrachtenden Bereichs jedes Leuchtschirms. Die Änderungsrate des Stroms der Netzteile stellt die Anforderung, die maximale Änderung des Stroms zwischen zwei Messpunkten möglichst klein zu halten. Für den Optimierungsalgorithmus bedeutet dies eine zusätzliche Anforderung, denn eine zu kleine Wahl der Schrittweite führt zu einem erheblichen Mehraufwand an Messzeit.

Die unsymmetrischen Einstellungen bezüglich der Ströme der Korrekturdipolmagnete, im Falle der zweiten Messung von -2 A bis 0 A , ermöglichen eine für den S-DALINAC neue Methode der Strahldiagnose. Liegt bei einem Korrekturdipolmagnet eine solche Asymmetrie vor, wird dieser entweder am Rand oder in großem Winkel durchlaufen. Wird diese Form der Diagnose auf mehrere Magnete ausgedehnt und in Korrelation betrachtet, lassen sich Rückschlüsse auf den Strahlverlauf durch diese Magnete ziehen. So könnten diese Daten durch eine Simulation den Strahlverlauf im Beschleuniger aufzeigen und zu besseren Einstellungen beitragen.

Auf Grundlage der durch die bisherigen Messungen gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Skript entwickelt, das eine automatisierte Optimierung zur Einstellung ablenkfreier Quadrupolmagnete vornehmen kann.

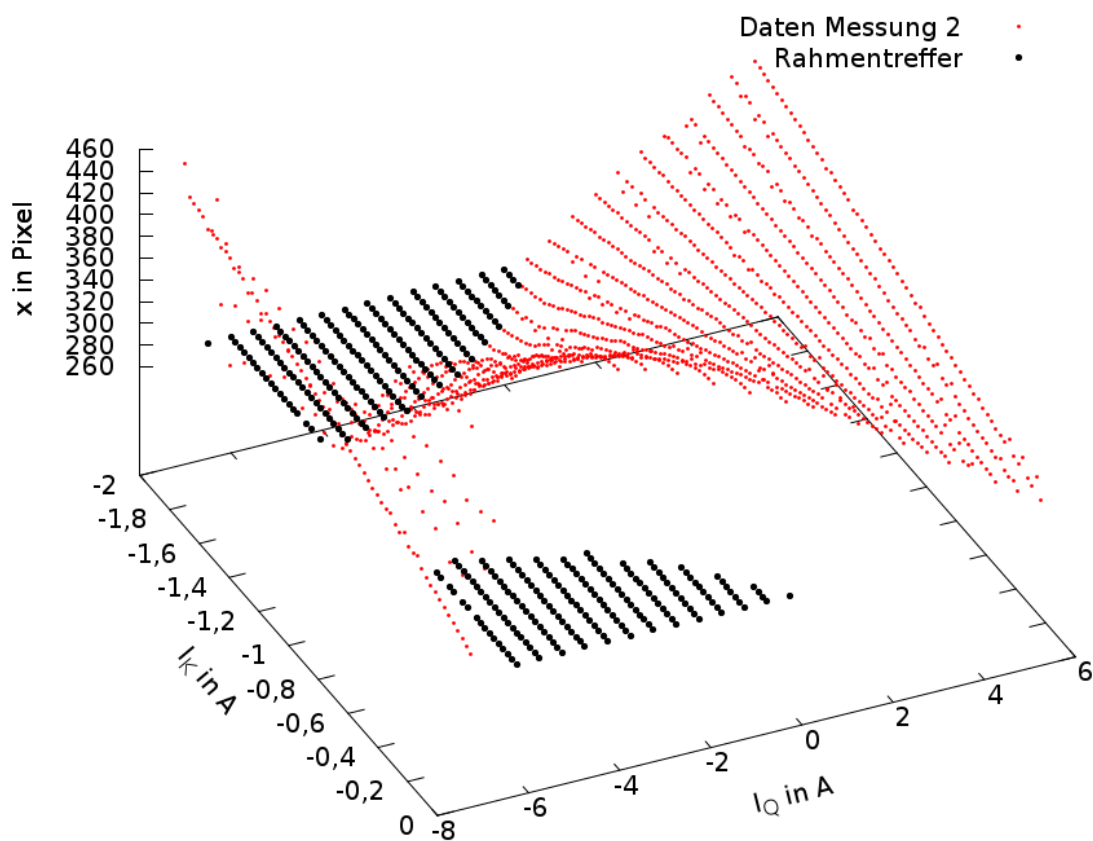


Abbildung 10.6.: Daten zu zweiten Messung. Schwarz markiert sind Messwerte, die nicht die Position des Strahls angeben, da dieser auf dem Rahmen des Leuchtschirms traf.

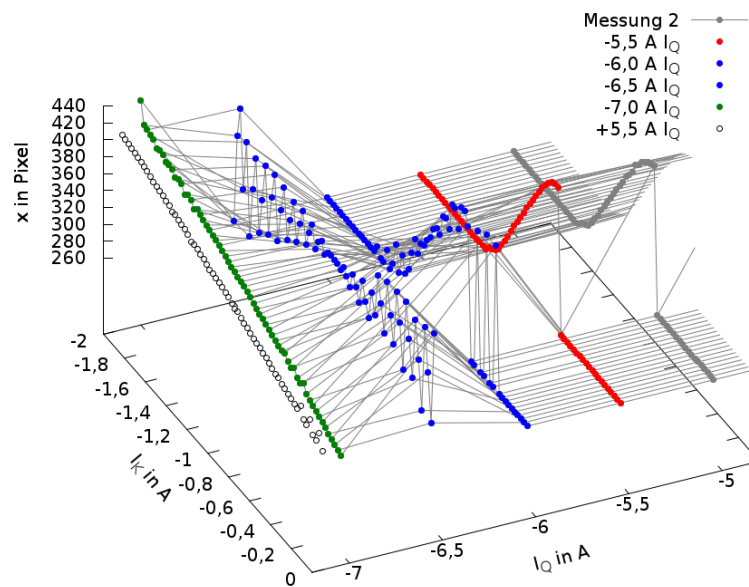


Abbildung 10.7.: Ausschnitt der Messdaten der zweiten Messung. Grün dargestellt ist die Messreihe mit -7 A Strom des Quadrupolmagnets, die nahezu der Messreihe von $+5,5\text{ A}$, durch schwarze Kreise markiert und verschoben dargestellt, entspricht. Die beiden in blau eingetragenen Datenreihen zeigen, dass das Netzteil den Sollwert zum Aufnahmezeitpunkt noch nicht erreicht hatte. In rot dargestellt ist die Datenreihe des niedrigsten Quadrupolmagnetstroms von $-5,5\text{ A}$, der noch zur Auswertung genutzt werden kann. In Grau sind die weiteren Werte der Messung angedeutet. Diese Daten zeigen das erwartete Verhalten des Netzteils, das zum Zeitpunkt der Datenaufnahme den geforderten Wert noch nicht erreicht hatte.

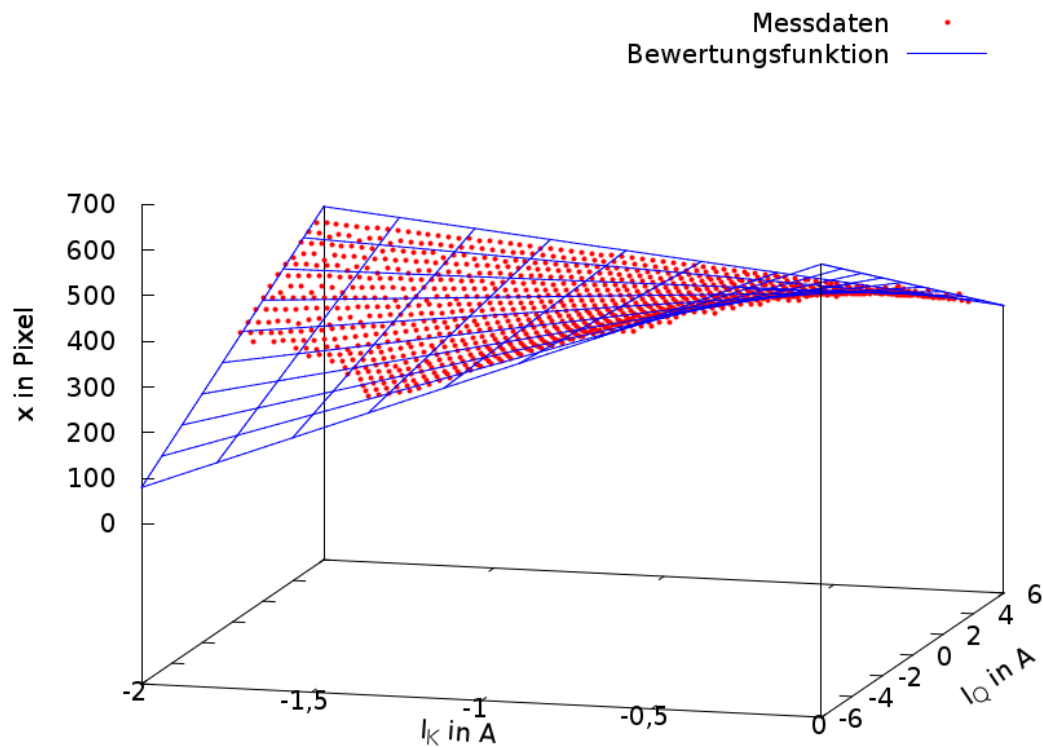


Abbildung 10.8.: Durch rote Punkte dargestellt sind die Messdaten der zweiten Messung, jedoch ohne Rahmentreffer und den Daten, die durch das Verhalten der Netzteile falsch zugeordnet wurden. Die angepasste Bewertungsfunktion wurde blau dargestellt. Durch die Übereinstimmung gerechtfertigt, kann angenommen werden, dass die Messdaten eine Verteilung aufweisen, wie durch die Bewertungsfunktion vorhergesagt.

10.3 Automatisierte Optimierung zu ablenkfreien Quadrupolmagneten

10.3.1 Liste der Anforderungen

Die verschiedenen Anforderungen an die Software zur automatisierten Optimierung der Strahlführung definierten den Rahmen der entwickelten Lösung.

- Die erstellte Lösung musste zu EPICS voll kompatibel sein.
- Zusätzlich musste diese eine hohe Flexibilität aufweisen, um einfach an unterschiedliche Optimierungsparameter und Geräte der Strahloptik anpassbar zu sein.
- Das Ergebnis musste in Präzision und Geschwindigkeit eine manuelle Einstellung übertreffen.
- Die Bedienung sollte möglichst einfach und übersichtlich sein und dabei die Flexibilität nicht einschränken.

Aus den bisherigen Erkenntnissen ergaben sich weitere Anforderungen an den Algorithmus, der zur Optimierung verwendet wird.

- Die Möglichkeit eine Bewertungsfunktion einzusetzen, bietet einen Zeitvorteil, wegen der geringeren Zahl an aufzunehmenden Datenpunkten.
- Dabei sollte andererseits keine Einschränkung geschaffen werden, für jede Optimierung eine solche Funktion definieren zu müssen.
- Aus der Änderungsrate des Stroms, welche die verwendeten Netzteile bieten, definiert sich die Forderung nach einer möglichst geringen Änderung der Stromwerte zwischen zwei Messpunkten.
- Wobei aber gleichzeitig ein möglichst großer Bereich in geringer Zeit erfasst werden soll.
- Rahmentreffer sollten vermieden werden.

Die EPICS-basierte Steuerung der Netzteile bietet dazu eine PV an, die das Erreichen des Sollwertes des Netzteils als Signal zurückgibt. Durch dieses Signal wird es möglich, eine Messung erst nach der Bestätigung durch das Netzteil, den Sollwert erreicht zu haben, durchzuführen. Daraus folgt, dass die Zeit, die ein Netzteil benötigt, um einen neuen Sollwert zu erreichen, bei der Berechnung die Dauer pro optimiertem Gerät berücksichtigt werden muss. Dies kann zur entscheidenden Größe werden.

In Konkurrenz stehen auch die Forderungen, einen möglichst großen Bereich zu erfassen, gleichzeitig aber Rahmentreffer zu vermeiden, wodurch der erfasste Bereich stark eingeschränkt wird.

Abtastalgorithmus

Auf Basis dieser Anforderungen und gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Software zur automatisierten Optimierung entwickelt. Eine logarithmische Spirale, welche in der Ebene liegt, die

von den Strömen von Korrekturdipolmagnet und Quadrupolmagnet aufgespannt wird genügt diesen Anforderungen.

Eine logarithmische Spirale liegt vor, wenn

$$x(\varphi) = a \cos(\varphi) e^{b\varphi} \quad (10.1)$$

und

$$y(\varphi) = a \sin(\varphi) e^{b\varphi} \quad (10.2)$$

gilt. Die logarithmische Spirale weist für jede Umdrehung den gleichen Vergrößerungsfaktor auf, ist also selbstähnlich und damit unabhängig von der Vergrößerung. Durch diese Eigenschaft der Skalierbarkeit werden die Datenpunkte im Zentrum dichter und nach außen hin weniger dicht gemessen, unabhängig von der angezeigten Größe des Leuchtschirms und des betrachteten Bereichs. Gleichzeitig ist die Entfernung zweier in Folge gemessener Messpunkte gering, bei insgesamt großer Flächenabdeckung. Mit den Messdaten, die von Messpunkten auf dieser Spirale stammen, werden die Parameter der Bewertungsfunktion angenähert¹. Dadurch sinkt die Zahl der notwendigen Messpunkte erheblich, was einen direkten Zeitvorteil bedeutet.

Im allgemeinen Fall wird der Ursprung des Koordinatensystems nicht auf das Zentrum der Spirale fallen. Weitere Anpassungen bezüglich der Streckung der Achsen, die durch die Grenzen der Ströme definiert werden führen mit Gl. (10.1) und Gl. (10.2) zu

$$I_K = \frac{I_{K,\max} + I_{K,\min}}{2} + I_{K,\text{aspect}} \cdot \cos(\varphi) \cdot \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{1}{2 \cdot \text{startfaktor}}\right)}{2\pi \text{ turns}} \cdot \varphi\right) \quad (10.3)$$

mit

$$I_{K,\text{aspect}} = (I_{K,\max} - I_{K,\min}) \cdot \text{startfaktor} \quad (10.4)$$

für den Strom des Korrekturdipolmagneten und

$$I_Q = \frac{I_{Q,\max} + I_{Q,\min}}{2} + I_{Q,\text{aspect}} \cdot \sin(\varphi) \cdot \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{1}{2 \cdot \text{startfaktor}}\right)}{2\pi \text{ turns}} \cdot \varphi\right) \quad (10.5)$$

mit

$$I_{Q,\text{aspect}} = (I_{Q,\max} - I_{Q,\min}) \cdot \text{startfaktor} \quad (10.6)$$

für den Strom des Quadrupolmagneten Dabei stehen $I_{K,\min}$, $I_{K,\max}$, $I_{Q,\min}$ und $I_{Q,\max}$ für die Ströme der Grenzen des betrachteten Bereichs. Der *startfaktor* steuert, wie nah am Zentrum der Spirale der erste Messpunkt gesetzt wird. Durch den Parameter *turns* kann die Anzahl der Umdrehungen im Messbereich festgelegt werden. Diese beiden Parameter definieren das Wachstum des Radius. Details zur Implementierung, sowie die verwendeten Werte sind in Anhang A.2 aufgeführt.

¹ Dazu wurde *gnuplot* verwendet

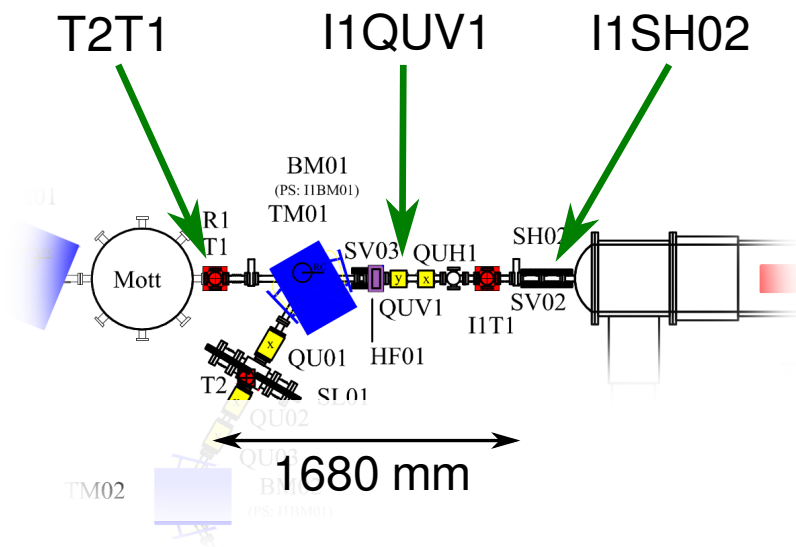


Abbildung 10.9.: Ausschnitt des hinteren Injektorbereichs und des Injektorbogens. Gekennzeichnet sind die für die hier vorgestellte automatisierte Optimierung verwendeten Geräte.

10.3.2 Durchführung einer automatisierten Optimierung

Die allgemeine Fragestellung zu dieser Messung verlangte den Einsatz einer vollständig funktionsfähigen automatisierten Optimierung der Strahlführung des S-DALINAC im laufenden Betrieb. Als konkrete Fragestellung wurde die ablenkfreie Einstellung des Quadrupolmagnets *I1QUV1* formuliert. Eine automatisierte Optimierung benötigt für die Messung des ersten Datenpunktes einen sichtbaren Strahlfleck auf einem Leuchtschirm. Dies wurde vom Operateur vor dem Start des Programms sichergestellt.

10.3.3 Instrumente

Der zur Messzeit, dem 3. Februar 2017, stattfindende Betrieb gab die zu verwendenden Magnete der Strahlführung vor. Als Korrekturdipolmagnet wurde *I1SH02*, als ablenkfrei zu optimierender Quadrupolmagnet *I1QUV1* und als Leuchtschirm *I2T1* verwendet.

Zum Optimieren wurde die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software genutzt, welches die oben vorgestellte Bewertungsfunktion sowie die Methode spiralförmig gesetzter Messpunkte verwendete und eine Anpassung der Parameter der Funktion an die Messwerte vornahm.

10.3.4 Ergebnisse

Zur Aufnahme der in Abb. 10.10 rot dargestellten 40 Datenpunkte wurde weniger als eine Minute benötigt. Die Parameter der in blau gezeichneten Bewertungsfunktion dienten als Grundlage zur Berechnung des Stroms des Korrekturdipolmagnets. Durch das Setzen des so berechneten Wertes konnte der Quadrupolmagnet ablenkfrei eingestellt werden, was durch manuelle Kontrolle nach Abschluss der Optimierung verifiziert wurde.

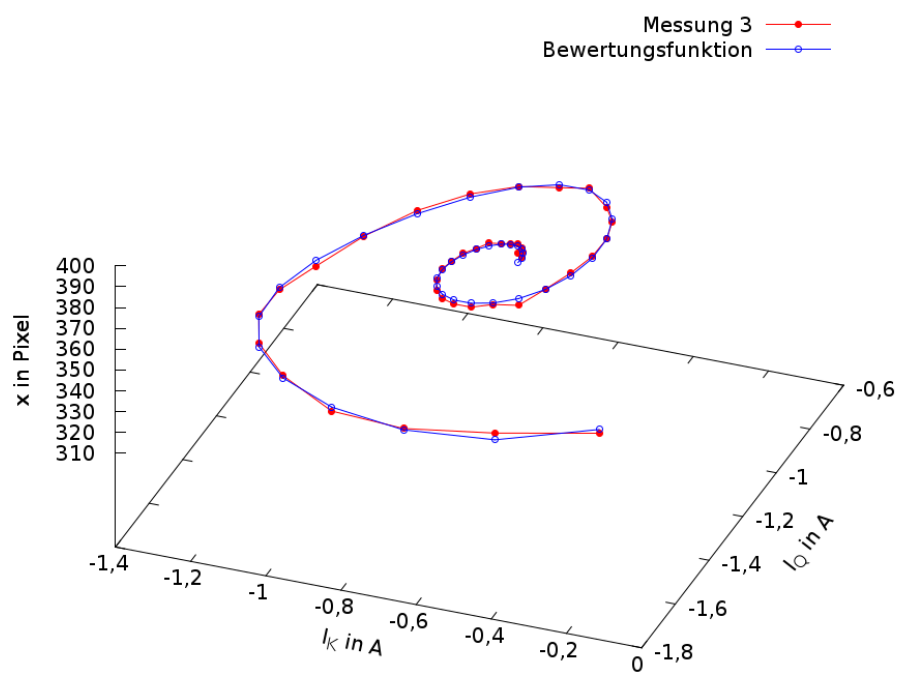


Abbildung 10.10.: Die Abbildung zeigt Messung 3 mit Anwendung der automatisierten Optimierung. Messdaten entlang der Spirale sind rot eingezeichnet, die Bewertungsfunktion ist blau dargestellt.

Die Anpassung der Parameter der Bewertungsfunktion erfolgte durch *gnuplot* mit folgendem Ergebnis:

| | | | |
|-----|--------|------------|----------|
| a = | 85,86 | $\pm 4,32$ | (5,0 %) |
| b = | 36,88 | $\pm 2,77$ | (7,5 %) |
| c = | 43,99 | $\pm 3,55$ | (8,1 %) |
| d = | 407,89 | $\pm 3,42$ | (0,84 %) |

$$I_K = -0,838 \text{ A} \pm 0,092 \text{ A} \quad (11 \%)$$

Woraus sich ein Strom von $(-0,838 \pm 0,092) \text{ A}$ für den Korrekturdipolmagnet ergab, während der Strom für den Quadrupolmagnet auf 0 A eingestellt wurde.



11 Resultate

Die wichtigste Neuerung der Digitalisierung der Bilderfassung ist die Möglichkeit, eine automatisierte Optimierung einsetzen zu können.

11.1 Automatisierte Optimierung

Mit dieser Arbeit ist eine automatisierte Optimierung der Strahlführung am S-DALINAC eingesetzt worden. Am Beispiel der ablenkfreien Einstellung eines Quadrupolmagnets wurde die Funktionsfähigkeit demonstriert. Die Möglichkeit, auf eine Bewertungsfunktion zurückgreifen zu können, ist ein erheblicher zeitlicher Vorteil und erleichtert die Integration eines Algorithmus zur Optimierung. Einstellungen, für die keine Bewertungsfunktion bekannt ist, können ebenfalls automatisiert optimiert werden, auch wenn dafür ein zusätzlicher Programmieraufwand notwendig wird.

11.2 Erweiterte Diagnosemöglichkeiten

Neben der automatisierten Optimierung der Strahloptiken ermöglicht die im Rahmen dieser Arbeit implementierte Digitalisierung der Bildgebung neue Diagnosemöglichkeiten. Die Funktion den Strahlschwerpunkt auf Leuchtschirmen pixelgenau auszuwerten kann dazu genutzt werden, Rückschlüsse auf den Strahlverlauf durch mehrere Magnete hindurch zu ziehen.

11.3 Langzeitdiagnose

Diagnose zu Veränderungen der Strahloptiken über Zeiträume von mehreren Monaten werden mit dem durch diese Arbeit implementierten System ermöglicht. Durch ein Skript, das für eine Messung einen Leuchtschirm selbständig in den Strahl fährt, könnten ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand Daten in regelmäßigen Abständen erhoben werden. Dazu muss allerdings sicher gestellt werden, dass eine solche Messung keine Störung des Betriebes, wie der Datenaufnahme eines Experiments oder eine Zerstörungsgefahr durch einen zu hohen Strom auf einem Leuchtschirm bedeutet.

11.4 Erweiterte Anzeigemöglichkeiten

Durch den Digitalisierer wird eine ganze Reihe von Bild- und Videoformaten im Netzwerk verfügbar. Über ein Browserfenster kann direkt auf den Digitalisierer zugegriffen werden. Einzelbilder sind ebenso abrufbar, wie einige Videoformate. Dabei können acht, statt bislang nur vier Bilder gleichzeitig angezeigt werden.

Die Digitalisierung der Bildgebung erweitert die Möglichkeiten der Anzeige auf die Monitore der Kontrollraumrechner. Bislang waren analoge Röhrenmonitore zur Anzeige von Leuchtschirmen notwendig. Die digitalisierten Bilder können auf jedem Rechner im Netzwerk angezeigt werden, wodurch der Kontrollraum flexibler eingerichtet werden kann.

Abschließend bleibt zu erwähnen, dass das System der automatisierten Optimierung nun bereit ist, im regulären Betrieb des S-DALINAC eingesetzt zu werden und anhand der dort gewonnenen Erfahrungen eine Weiterentwicklung zu erfahren.

12 Ausblick

12.1 Entwicklungen für OPI und IOC

Die für eine automatisierte Optimierung notwendigen Parameter wurden für die bisherigen Messungen manuell in die Skripte der Automatisierung eingegeben. Daraus resultiert eine große Flexibilität und eine schnelle und einfache Möglichkeit der Anpassung dieser Parameter. Die Erfahrung, die mit anderen Systemen gesammelt wurde, zeigt, dass der Einsatz der Werkzeuge im regulären Betrieb die nötigen Anforderungen an eine effiziente Oberfläche definiert. Dafür ist eine CSS-Oberfläche zu entwickeln und eine weitere Evolution der Nutzerfreundlichkeit durch Benutzung im regulären Strahlbetrieb zu erwarten.

Mit dem Schritt, die automatisierte Optimierung im regulären Strahlbetrieb einzusetzen, entsteht die Forderung den hierfür entwickelten IOC auf eine virtuelle Maschine zu installieren. Bisher wurde zu Testzwecken dafür ein Bürorechner eingesetzt. Die Konfiguration zur Einrichtung dieses IOCs hat zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit bereits begonnen.

12.2 Verbesserung des Bildes

Die Forderung einer möglichst großflächigen Abbildung des Leuchtschirms auf dem Bildschirm kann auf verschiedene Weisen erfüllt werden. Weitere Verbesserungen der Bildauswertung beziehen sich auf die Steigerung der Wiederholungsrate der Bildabtastung und werden in den folgenden Abschnitten im Einzelnen behandelt.

Definition der Region der Diagnose

Derzeit wird die von der digitalen Auslese betrachtete Region als Rechteck mit zu den Achsen parallelen Kanten angegeben. Die beobachteten Leuchtschirme bilden durch ihre kreisrunde Form, die unter einem Winkel von 45° beobachtet werden, auf dem Monitor eine Ellipse aus. Diesem Umstand könnte durch die Programmierung eines ovalen Bereich zur Auslese Rechnung getragen werden.

12.2.1 Objektive

Üblicherweise sind Kameras an Kreuzen der Vakuumkammer mit einer Entfernung von etwa 12 cm vom Leuchtschirm montiert. Um die Bildfläche der Kamera vollständig zu nutzen, wurde die Umrüstung auf Objektive mit einer Brennweite von 16 mm aller am S-DALINAC verwendeten Kameras im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich getestet. Im Vergleich zu den zuvor verwendeten Objektiven kann dadurch eine um bis zu zwei Größenordnungen höhere Zahl an Pixeln zur Berechnung genutzt werden. Im Zuge des Austauschs der Objektive auf Linsen mit besser angepasster Brennweite wurden Prototypen neu entwickelter Bleisteine entwickelt und eingebaut.

Diese ermöglichen durch die geänderte Bauweise ein Tauschen der Kamera, ohne den gesamten Bleistein demontieren zu müssen, wodurch die Ausrichtung des Bleisteins erhalten bleibt. Des Weiteren kann das Objektiv in montiertem Zustand auf den Leuchtschirm scharf gestellt werden, was die Arbeitszeit für Austausch und Justierung einer Kamera deutlich verkürzt.

12.2.2 Verbesserung des Systems aus Leuchtschirm und Kamera

Um die Bildfläche der Kameras für die automatisierte Diagnose besser zu nutzen, wäre es möglich die Kameras in einer durch Strahlverlauf und Target vorgegebenen Orientierung auszurichten. Die Großzahl der kreisrunden Leuchtschirme sind mit einem Winkel von 45° sowohl zum Strahl, als auch zur Kamera-Achse montiert. Damit wird die Abbildung des Leuchtschirms entlang der Strahlachse um den Faktor 0,7 gestaucht. Üblicherweise liegt die gestauchte Achse des Leuchtschirms auf der horizontalen Achse von Kamera und Monitor. Wird die vertikale Achse der Kamera auf die gestauchte Achse des Leuchtschirms ausgerichtet, kann eine größere Zahl an Pixeln der Kamera zur Auswertung genutzt werden. Durch die Digitalisierung der Bilddaten ist es möglich die Anzeige entgegengesetzt gedreht auf den Monitoren abzubilden.

Das auf den Leuchtschirmen sichtbare Fadenkreuz aus nicht mit Gold bedampften Linien verringert die Genauigkeit der digitalen Bestimmung der Schwerpunkte, da die Fluoreszenz dort weniger unterdrückt wird. Bei einer manuellen Einstellung des Strahls werden diese Linien nur als Orientierungshilfe genutzt, wobei diese Linien auch durch eine digitale Nachbearbeitung des Bildes über das Signal gelegt werden können. Daraus folgt, dass durch homogen mit BeO bedampfte Leuchtschirme eine Verbesserung der Ergebnisse der digitalisierten Diagnose möglich ist, ohne dabei Nachteile auf Seiten der manuellen Einstellung zu erzeugen.

Hintergrundsubtraktion

Eine mögliche Subtraktion des Hintergrundes ist im Algorithmus, mit dem die Daten dieser Arbeit aufgenommen wurden nicht implementiert. Die hohe Signalstärke des Strahls auf einem Leuchtschirm, gemeinsam mit dem Setzen eines Schwellwerts, erfordert die Implementierung eines solchen Verfahrens nicht. Eine Implementierung wird durch die automatische Kamerablende erschwert, die das gesamte Bild abdunkelt, sobald der Elektronenstrahl den Leuchtschirm trifft, da dieser aufgrund der BeO Beschichtung sehr stark überstrahlt. Die Implementierung einer Hintergrundsubtraktion würde den Kontrast erhöhen und auch schwächer beleuchtete Regionen des Leuchttargets erkennbar machen.

Wiederholungsrate der Bildabtastung

Der für die Messungen genutzte Datenausgang des Digitalisierers überträgt im gewählten Format Daten mit einer Aktualisierungsrate von etwa 0,8 Hz. Auf die Dauer der Optimierung hatte diese Rate Einfluss, wobei zusätzlich für jeden Messpunkt sichergestellt werden muss, dass die Netzteile der Magnete den geforderten Wert vor der Datenaufnahme erreicht haben. Eine erhöhte Aktualisierungsrate ist erstrebenswert, was durch die Nutzung eines Videoformats ermöglicht werden könnte, insofern eine Schnittstelle zur Importierung des entsprechenden Formates entwickelt wird.

12.3 Weitere Einsatzgebiete einer automatisierten Optimierung

Neben der Optimierung von der Einstellung der Korrekturdipolmagnete auf ablenkfreie Quadrupolmagnete sind weitere Optimierungen von Strahleigenschaften möglich. Eine präzise Definition der zu optimierenden Parameter, sowie der dazu zur Verfügung stehenden Variablen und deren wählbare Bereiche sind essenziell. Ist eine analytische Definition einer Bewertungsfunktion möglich, erleichtert dies zwar die Implementierung, ist aber keine Voraussetzung dafür. Kann keine solche Funktion angegeben werden, stehen Optimierungsalgorithmen zur Verfügung, die mit verschiedenen Sicherheiten und Geschwindigkeiten gegen das gesuchte Optimum konvertieren. Im Allgemeinen vergrößert dies den notwendigen Zeitaufwand.

Bei der Definition der Bewertungsfunktion und der Entwicklung eines Algorithmus zur automatisierten Optimierung sollte auf die Erfahrung der Operateure zurückgegriffen werden, um die tatsächlichen Anforderungen an eine Optimierung möglichst exakt abzubilden. Prinzipiell sind alle messbaren und durch das Kontrollsystem einstellbaren Größen des S-DALINAC durch Anpassungen des Optimierungsalgorithmus auf einen vorgegebenen Parameter optimierbar. Neben der bereits implementierten Methode für ablenkfreie Quadrupolmagnete könnten Optimierungen für horizontal Dispersionsfreie Bögen, transversale Dispersion oder, durch Nutzung von Scrapersystemen, die Energieschärfe entwickelt werden.

Eine vieldimensionale Optimierung besitzt im Allgemeinen zu viele Freiheitsgrade, um mit akzeptablem Zeitaufwand hinreichend gute Ergebnisse zu liefern.

12.4 Bezug zu Anschlussprojekten

12.4.1 Regelschleife mit Simulation

Die Digitalisierung der Diagnose ermöglicht einen Dateneingang des Zustands des realen Beschleunigers in eine Simulation. Die Simulationsergebnisse können, durch die Migration des Kontrollsystems, an den Beschleuniger übertragen werden, wodurch eine Regelschleife aus digitalisierter Diagnose, Simulation und Beschleunigersteuerung aufgebaut werden kann.

12.4.2 Neuronale Netze

Ein deutlich weiter in die Zukunft reichendes Anschlussprojekt mit großem Umfang könnte ein Thema der aktuellen Forschung der Informatik aufgreifen, das Forschungsgebiet der systemintegrierten Intelligenz. Die vollständige Digitalisierung der Einstellung und Diagnose der strahlführenden Elemente des S-DALINAC ermöglicht nun erstmals den rechnergestützten Zugriff auf alle relevanten Größen. Die komplexe Aufgabe einer optimalen Einstellung der Strahlführung in einer kontrollierbaren Umgebung bietet eine gute Ausgangslage für den Einsatz und der Forschung zu selbstlernenden Systemen zum Aufbau neuronaler Netze mit dem Ziel, eine optimale Strahlführung, auch für noch unbekannte Zustände, autonom einstellen zu lassen. Entsprechende Technologien wurden an Beschleunigern bereits eingesetzt [66].



A Anhang

A.1 Konfiguration des AreaDetector-IOCs

Dieses Skript installiert die AreaDetector-Software und startet den IOC auf einem lokalen Rechner. Damit kann es Grundlage zur Konfiguration eines Servers genutzt werden. Der Rechner, auf dem dieses Skript entwickelt wurde, verfügte über das Linux-Betriebssystem *debian8*, eine EPICS-Installation, sowie der Installation der *Channel-Access*-Software, die eine Kommunikation zu EPICS durch Konsolenbefehle ermöglicht.

```
#!/bin/bash

function intro
{
    in='\033[1m\033[47m\033[30m'
    out='\033[0m'
    echo -e "${in}                                ${out}"
    echo -e "${in} ##### ${out}"
    echo -e "${in} ##                                ## ${out}"
    echo -e "${in} # Wozu dient dieses Skript?                # ${out}"
    echo -e "${in} #                                # ${out}"
    echo -e "${in} # Dieses Skript soll den kompletten areaDetector IOC erzeugen und # ${out}"
    echo -e "${in} # konfigurieren. Da ein Skript die hoechste Reproduzierbarkeit und # ${out}"
    echo -e "${in} # Nachvollziehbarkeit bietet, wird nach dem MultiplexerIOC auch der # ${out}"
    echo -e "${in} # areaDetectorIOC per Skript aufgesetzt.                # ${out}"
    echo -e "${in} #                                # ${out}"
    echo -e "${in} # Ein Skript kann beides:                                # ${out}"
    echo -e "${in} # Den IOC perfekt aufsetzen und dabei eine perfekte Dokumentation # ${out}"
    echo -e "${in} # abliefern.                                            # ${out}"
    echo -e "${in} #                                # ${out}"
    echo -e "${in} # Funktionsweise                                        # ${out}"
    echo -e "${in} # Es wird zunaechst ein minimaler IOC gebaut, der nach dem IKP      # ${out}"
    echo -e "${in} # Standard per Skript erzeugt wird. Dann werden alle Modifikationen # ${out}"
    echo -e "${in} # an den betroffenen Files vorgenommen und zusaetzliche Files an die # ${out}"
    echo -e "${in} # richtigen Stellen kopiert.                                # ${out}"
    echo -e "${in} #                                # ${out}"
    echo -e "${in} # IP des Digitalisierers                                # ${out}"
}
```

```

        echo -e "${in} # http://192.168.5.32/cgi-bin/viewer/video.jpg?channel=0 # ${
            out}"
        echo -e "${in} # # ${
            out}"
        echo -e "${in} # # ${
            out}"
        echo -e "${in} # Juni 2016 Thomas Schoesser # $
            {out}"
        echo -e "${in} ## ## ${
            out}"
        echo -e "${in} ##### ${out}"
        echo -e "${in}
            out}"
    }

function text
{
    line="+—"
    for (( i=1; i<${#1}; i++ )) ; do
        line+="-"
    done
    line+="-+"
    echo -e "\033[1m\033[33m"${line}"\033[0m"
    echo -e "\033[1m\033[33m| "$1" |\033[0m"
    echo -e "\033[1m\033[33m"${line}"\033[0m"
    sleep 0.5
}

function set_variables
{
    ioc_name="areaDetector"
    acs="/home/thomas/acs/"
    ioc_apps="${acs}frameworks/epics/iocapps/"
    trunk=${ioc_apps}${ioc_name}/trunk/"
#    path_templates=${ioc_apps}"areaDetector/uncompressed/areaDetector_R1-9-1_source/db/"
    path_templates=${ioc_apps}"templates/trunk/areaDetector/"
    support=${acs}frameworks/epics/support/"
    lib_dir="/usr/lib/epics"
    download_dir=${ioc_apps}${ioc_name}/archives/"
    device="areaDetector_1"
    maschine='uname -m'
    url1="URL1"
#    url1="digi:ch:URL1"
#    url1="http://192.168.5.32/cgi-bin/viewer/video.jpg"
#    url1="192.168.5.32"
    prefix="digi:"
    camera_name="ch:"
    image_name="img1"
    sub_image="image1:"
#    sub_image=${image_name}
    external_files_path="${trunk}external_files"
}

function print_variables
{
    text "Verwendete Variablen"
    echo " - Name des IOCs - "
    echo "ioc_name = "${ioc_name}
    echo " - Verzeichnisstruktur - "
    echo "acs = "${acs}
    echo "ioc_apps = "${ioc_apps}
    echo "trunk = "${trunk}
    echo "path_templates = "${path_templates}
}

```

```

echo "support =                "${support}
echo "lib_dir =                "${lib_dir}
echo "download_dir =          "${download_dir}
echo " - Files -              "
echo " - Substitutionen -     "
echo "device =                 "${device}
echo "maschine =               "${maschine}
echo "url1 =                   "${url1}
echo "prefix =                 "${prefix}
echo "camera_name =            "${camera_name}
echo "image_name =             "${image_name}
echo "sub_image=               "${sub_image}
echo "external_files_path =    "${external_files_path}
}

function purge_old_data
{
    text "alte IOC-Files loeschen"
    rm -rf ${trunk}
    echo "Alle Files geloescht"
}

function create_directories
{
    text "Anlegen der Verzeichnisstruktur"
    cd ${ioc_apps}
    mkdir ${ioc_name} -p
    cd ${ioc_name}
    mkdir ${trunk} -p
    cd ${trunk}
    mkdir dbd -p
    cd ${trunk}
#    mkdir ${download_dir} -p
    cd ${trunk}
    mkdir external_files -p
    echo "Verzeichnisse erstellt"
}

function install_packages
{
    text "Pakete"
    package_names=("epics-dev" "edm" "edm-color-default" "epics-areadetector" "epics-
areadetector-dev" "libaravis0.2" "libareadetector1.9" "libc-bin" "libcbf0" "
libgraphicsmagick++1-dev" "libhdf5-7" "libnetpbm10" "libservlet3.0-java" "
libsynapps20111025" "libtiff4" "libtinyxml-dev" "libtomcat7-java" "libxp6" "linux-libc-
dev" "man-db" "netpbm" "imagej-areadetector" "libxml2-dev")
    for package_name in ${package_names[@]}; do
        echo "Paket: "${package_name}
#        package_count=`dpkg -l | grep " ${package_name} " -c` # besser waere, cut -f2 zu
        verwenden.
        package_count=`dpkg -l | sed 's/ /\t/g' | cut -f3 | grep "${package_name}" -c`
#        text "Paket "${package_name} ist "${package_count}" mal vorhanden."
        if [ "${package_count}" = 0 ]
        then
            # switched package installation to off
            echo "Ich wuerde jetzt ${package_name} installieren, das ist aber
            gerade abgeschaltet. Funktion install_packages im Script"
            #text "installiere "${package_name}
            # check, ob in /etc/apt/sources.list das Debianrep richtig
            eingetragen ist. Siehe http://ikpweb.ikp.physik.tu-darmstadt.de/mediawiki/index.php/Debianrep#Nutzung
#            apt-get install ${package_name}
        fi
    done
}

```

```

done
echo "Installation der Pakete abgeschlossen."
}

function build_epics_base
{
    text "Basis IOC bauen"
    cd ${trunk}
    if [ "${maschine}" = "i686" ]
    then
        maschine="x86"
    fi
    makeBaseApp -t ioc ${ioc_name}
    makeBaseApp -i -t ioc -a linux-${maschine} -p ${ioc_name} linux-${maschine}
    make
    cd iocBoot/ioclinux-${maschine}
    chmod 744 st.cmd
    echo "makeBaseApp abgeschlossen"
}

function fetch_external_files
{
    text "Externe Files holen"
    download_areaDetector_active="no" # if "yes" 95 MB will be downloaded. Other than "yes"
    will copy 95 MB from download archive.
    download_imagej_active="no" # 1.5 MB bzw. 77 MB
    download_jca_active="no" # 0.1 MB
    cd ${external_files_path}
    if [ ${download_areaDetector_active} = "yes" ]
    then
        wget http://cars.uchicago.edu/software/pub/areaDetectorR1-9-1.tgz
    else
        cp ${trunk}../archives/R1-9-1/areaDetector_1_9_1_source/areaDetectorR1-9-1.tgz .
    fi
    if [ ${download_imagej_active} = "yes" ]
    then
        # wget https://imagej.nih.gov/ij/download/src/ij151e-src.zip
        wget http://wsr.imagej.net/distros/linux/ij150-linux64-java8.zip
    else
        # cp ${trunk}../archives/ImageJ/ij151e-src.zip .
        cp ${trunk}../archives/ImageJ/ij150-linux64-java8.zip .
    fi
    if [ ${download_jca_active} = "yes" ]
    then
        wget http://www.aps.anl.gov/bcda/jca/jca/download/jca2.1.2-src.tgz
    else
        cp ${trunk}../archives/ImageJ/jca2.1.2-src.tgz .
    fi
    # echo "Externe Files unter ${external_files_path} abgelegt"
    echo "Externe Files geholt"
}

function extract_files
{
    text "IOC Files entpacken"
    cd ${external_files_path}
    xarchiver -x . areaDetectorR1-9-1.tgz
    xarchiver -x . ij150-linux64-java8.zip
    # xarchiver -x . ij151e-src.zip
    # xarchiver -x . jca2.1.2-src.tgz
    echo "Entpacken beendet"
}

```



```

function garbage_collector
{
    text "Loesche ueberfluessige Daten"
    cd ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/Viewers
    rm -rf IDL/
    cd ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/ADApp/magickSupport/os/
    rm -rf WIN32/
    rm -rf solaris*
    rm -rf darwin-x86/
    rm -rf cygwin32/
    cd ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/ADApp/hdf5Support/os/
    rm -rf darwin-x86/
    echo "Loeschen abgeschlossen"
}

function set_external_release
{
    cd ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1
    release_file="configure/RELEASE"
    sed -i "s|^SUPPORT=/corvette/home/epics/devel|# SUPPORT=/corvette/home/epics/devel\nSUPPORT
    =/usr/lib/epics\n|" ${release_file}
    sed -i "s|^ASYN=\$(SUPPORT)/asyn-4-21|# ASYN=\$(SUPPORT)/asyn-4-21\nASYN=/usr/lib/epics|" ${
    release_file}
    sed -i "s|^CALC=\$(SUPPORT)/calc-3-0|# CALC=\$(SUPPORT)/calc-3-0\nCALC=/usr/lib/epics|" ${
    release_file}
    sed -i "s|^BUSY=\$(SUPPORT)/busy-1-4|# BUSY=\$(SUPPORT)/busy-1-4\nBUSY=/usr/lib/epics|" ${
    release_file}
    sed -i "s|^SSCAN=\$(SUPPORT)/sscan-2-8-1|# SSCAN=\$(SUPPORT)/sscan-2-8-1\nSSCAN=/usr/lib/
    epics|" ${release_file}
    sed -i "s|^AUTOSAVE=\$(SUPPORT)/autosave-5-0|# AUTOSAVE=\$(SUPPORT)/autosave-5-0\nAUTOSAVE
    =/usr/lib/epics|" ${release_file}
    sed -i "s|^AREA_DETECTOR=\$(SUPPORT)/areaDetector-1-9-1|# AREA_DETECTOR=\$(SUPPORT)/
    areaDetector-1-9-1\nAREA_DETECTOR=${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1|" ${
    release_file}
    sed -i "s|^EPICS_BASE=/corvette/usr/local/epics/base-3.14.12.3|# EPICS_BASE=/corvette/usr/
    local/epics/base-3.14.12.3\nEPICS_BASE=/usr/lib/epics|" ${release_file}
}

function make_external_ioc
{
    cd ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1
    make
}

function copy_dbd_files
{
    text "Kopiere Files"
    cp ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/dbd/AD* ${trunk}/dbd
    cp ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/dbd/ND* ${trunk}/dbd
    cp ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/dbd/URL* ${trunk}/dbd
    echo "Files kopiert."
}

function create_template
{
    template_file="${path_templates}${ioc_name}.template"
    echo 'record(calc, "areaDetector:getMaxX")' > ${template_file}
    echo '{' >> ${template_file}
    echo '    field(INPA, "digi:ROI1:MinX CPP MS")' >> ${template_file}
    echo '    field(INPB, "digi:Stats1:CentroidX_RBV CPP MS")' >> ${template_file}
    echo '    field(CALC, "A+B")' >> ${template_file}
}

```

```

echo ' field(SCAN, "Passive")' >> ${template_file}
echo '}' >> ${template_file}
echo '' >> ${template_file}
echo 'record(calc, "areaDetector:getMaxY")' >> ${template_file}
echo '{' >> ${template_file}
echo ' field(INPA, "digi:ROI1:MinY CPP MS")' >> ${template_file}
echo ' field(INPB, "digi:Stats1:CentroidY_RBV CPP MS")' >> ${template_file}
echo ' field(CALC, "A+B")' >> ${template_file}
echo ' field(SCAN, "Passive")' >> ${template_file}
echo '}' >> ${template_file}
echo '' >> ${template_file}
}

function manage_templates
{
    create_template
    templates=("ADBase.template" "ADPrefixes.template" "NDColorConvert.template" "NDFile.
        template" "NDFileHDF5.template" "NDFileJPEG.template" "NDFileMagick.template" "
        NDFileNetCDF.template" "NDFileNexus.template" "NDFileTIFF.template" "NDOverlay.template"
        "NDOverlayN.template" "NDPluginBase.template" "NDProcess.template" "NDROI.template" "
        NDStats.template" "NDStdArrays.template" "NDTransform.template" "URLDriver.template" "
        simDetector.template")
    for template in ${templates[@]}; do
        cp ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/ADApp/Db/${template} ${path_templates}
    done
    unset templates
}

function copy_plugin_files
{
    cp -r ${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1/Viewers/ImageJ/EPICS_areaDetector ${
        external_files_path}/ImageJ/plugins
    # ein="\033[1m" ; aus="\033[0m" ; echo -e "Zum aktivieren des areaDetector plugins auf $ein
        ImageJ $aus —> $ein Plugins $aus —> $ein Compile and Run... $aus —> $ein
        EPICS_areaDetector $aus —> $ein EPICS_AD_Viewer.java $aus klicken."
    # und als Macro:      run("Compile and Run...", "compile=/home/thomas/acs/frameworks/
        epics/iocapps/areaDetector/trunk/external_files/ImageJ/plugins/EPICS_areaDetector/
        EPICS_AD_Viewer.java"); selectWindow("digi:image1:");
}

function add_lines
{
    original_IFS="$IFS"
    IFS=$'\n'
    filename=$1
    search_phrase=$2
    line_prefix=$3
    line_suffix=$4
    line_number='grep "${search_phrase}" ${filename} -n -m 1 | sed 's/:.*$//''
    for line in ${include_lines[@]}; do
        sed -i "${line_number} a\\${line_prefix}${line}${line_suffix}" ${filename}
        line_number=$(( ${line_number} + 1 ))
    done
    unset include_lines
    IFS="$original_IFS"
}

function set_release
{
    text "RELEASE konfigurieren"
    cd ${trunk}configure
    # sed -i "/^TEMPLATE_TOP/ a\\nDBTEMPLATES=$(TOP) \\/..\\/uncompressed\\/areaDetector_R1-9-1
        _source" RELEASE

```

```

#       sed -i "/^TEMPLATE_TOP/ a\\nDBTEMPLATES=\$(TOP) \\/..\\\/..\\\/ templates\\\/trunk\\\/areadetector"
RELEASE
sed -i "/^TEMPLATE_TOP/ a\\nDBTEMPLATES=\$(TOP) \\/..\\\/..\\\/ templates\\\/trunk" RELEASE
echo "" >> RELEASE
echo "ASYN=/usr/lib/epics" >> RELEASE
echo "BUSY=/usr/lib/epics" >> RELEASE
echo "AREADETECTOR=${external_files_path}/areaDetectorR1-9-1" >> RELEASE
echo "Konfiguration von RELEASE beendet"
}

function set_makefile_src
{
    text "src/Makefile konfigurieren"
    cd ${trunk}${ioc_name}App/src
    sed -i "/^#${ioc_name}_LIBS += xxx$/ a\\n# LIB_LIBS\\n\\n# PROD_LIBS\\n\\n# PROD_SYS_LIBS\\n\\n#
        SYS_LIBS\\n" Makefile
    include_lines+=("asyn.dbd")
    include_lines+=("busySupport.dbd")
    include_lines+=("ADSupport.dbd")
    include_lines+=("NDPluginSupport.dbd")
    include_lines+=("URLDriverSupport.dbd")
#    include_lines+=("NDPluginStats.dbd")
    add_lines "Makefile" "^#${ioc_name}_DBD += xxx.dbd$" "${ioc_name}_DBD += "
    include_lines+=("URLDriver")
    include_lines+=("asyn")
    include_lines+=("NDPlugin")
    include_lines+=("ADBase")
    include_lines+=("busy")
    include_lines+=("NDFileMagick")
    include_lines+=("netCDF")
    include_lines+=("PvAPI")
    add_lines "Makefile" "^#${ioc_name}_LIBS += xxx$" "${ioc_name}_LIBS += "
    include_lines+=("GraphicsMagick++")
    include_lines+=("GraphicsMagickWand")
    include_lines+=("GraphicsMagick")
    add_lines "Makefile" "^# LIB_LIBS$" "LIB_LIBS_Linux += "
    include_lines+=("GraphicsMagick++")
    include_lines+=("GraphicsMagickWand")
    include_lines+=("GraphicsMagick")
    add_lines "Makefile" "^# PROD_LIBS$" "PROD_LIBS_Linux += "
    include_lines+=("X11")
    include_lines+=("gomp")
    add_lines "Makefile" "^# PROD_SYS_LIBS$" "PROD_SYS_LIBS_Linux += "
    include_lines+=("tinyxml")
    include_lines+=("pthread")
    include_lines+=("tiff")
    include_lines+=("png12")
    include_lines+=("jpeg")
    include_lines+=("z")
    include_lines+=("rt")
    include_lines+=("m")
    include_lines+=("xml2")
    include_lines+=("bz2")
    include_lines+=("NeXus")
    include_lines+=("hdf5")
    include_lines+=("sz")
    include_lines+=("Xext")
    include_lines+=("freetype")
    add_lines "Makefile" "^# SYS_LIBS$" "${ioc_name}_SYS_LIBS += "
#    include_lines+=("NDPluginStats.cpp")
#    add_lines "Makefile" "^#${ioc_name}_SRCS += " "${ioc_name}_SRCS += "
    echo "Konfiguration von src/Makefile beendet"
}

```

```

function set_makefile_Db
{
    text "Db/Makefile konfigurieren"
    cd ${trunk}${ioc_name}App/Db
    templates=("areaDetector.template" "NDTransform.template" "NDStdArrays.template" "NDStats.
        template" "NDROI.template" "NDProcess.template" "NDPluginBase.template" "NDOverlayN.
        template" "NDOverlay.template" "NDFileTIFF.template" "NDFileNexus.template" "
        NDFileNetCDF.template" "NDFileMagick.template" "NDFileJPEG.template" "NDFileHDF5.
        template" "NDFile.template" "NDColorConvert.template" "simDetector.template" "URLDriver
        .template" "ADPrefixes.template" "ADBase.template")
    for template in ${templates[@]}; do
        sed -i "/^#DB += xxx.db$/ a\DB += ${template}" Makefile
        sed -i "/^# ADD RULES AFTER THIS LINE$/ a\\n..\\O.Common\\${template}: \${(
            DBTEMPLATES)\\areaDetector\\${template}\\n\\tcp \${< \${@\\n\\n\\${template}\\$(DEP):
            ..\\Makefile\\n\\t@\\$(RM) \${@\\n\\t@echo} \\\"\\$(COMMONDEP_TARGET): \\$(DBTEMPLATES)\\
            areaDetector\\${template}\\\" >> \${@}" Makefile
    done
    echo "Konfiguration von Db/Makefile beendet"
}

function set_st_cmd
{
    text "st.cmd konfigurieren"
    camera_width=704
    camera_height=576
    camera_pixels=$(( ${camera_height} * ${camera_width} * 5 / 4 )) # etwas mehr, fuer Metadaten
    camera_bytes=$(( ${camera_height} * ${camera_width} * 11 / 4 )) # = camera_pixels * bytes(Int16) =
        2, plus something
    stats1="stats1"
    roi1="ROI1"
    cd ${trunk}iocBoot/ioclinux-`${maschine}`
    sed -i "5 i\\epicsEnvSet(\"EPICS_CA_MAX_ARRAY_BYTES\", \"${camera_bytes}\")\\nepicsEnvSet(\"
        PREFIX\", \"${prefix}\")\\nepicsEnvSet(\"PORT\", \"URL1\")\\nepicsEnvSet(\"QSIZE\",
        \"20\")\\nepicsEnvSet(\"XSIZE\", \"704\")\\nepicsEnvSet(\"YSIZE\", \"576\")\\
        nepicsEnvSet(\"NCHANS\", \"2048\")\\n st.cmd
    include_lines+=("URLDriverConfig(\"${url1}\", 0, 0)")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}ADBase.template\", \"P=${prefix},R=${
        camera_name},PORT=${url1},ADDR=0,TIMEOUT=1\")")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}URLDriver.template\", \"P=${prefix},R=${
        camera_name},PORT=${url1},ADDR=0,TIMEOUT=1\")")
    include_lines+=("")
    include_lines+=("NDStdArraysConfigure(\"${image_name}\", 2, 0, \"${url1}\", 0, 0)")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDPluginBase.template\", \"P=${prefix},R=${
        sub_image},PORT=${image_name},ADDR=0,TIMEOUT=1,NDARRAY_PORT=${url1},NDARRAY_ADDR=0\")")
    include_lines+=("")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDStdArrays.template\", \"P=${prefix},R=${
        sub_image},PORT=${image_name},ADDR=0,TIMEOUT=1,TYPE=Int16,FTVL=SHORT,NELEMENTS=${
        camera_pixels}\")")
    include_lines+=("")
    include_lines+=("# common plugins")
    include_lines+=("NDROIConfigure(\"${roi1}\", \"${QSIZE}\", 0, \"${url1}\", 0, 0, 0)")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDPluginBase.template\", \"P=${prefix},R=${
        roi1}, PORT=${roi1},ADDR=0,TIMEOUT=1,NDARRAY_PORT=${url1},NDARRAY_ADDR=0\")")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDROI.template\", \"P=${prefix},R=${
        roi1}, PORT=${roi1},ADDR=0,TIMEOUT=1\")")
    include_lines+=("NDStatsConfigure(\"${stats1}\", \"${QSIZE}\", 0, \"${url1}\", 0, 0, 0)")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDPluginBase.template\", \"P=${prefix},R=${
        Stats1}, PORT=${stats1},ADDR=0,TIMEOUT=1,NDARRAY_PORT=${url1},NDARRAY_ADDR=0\")")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}NDStats.template\", \"P=${prefix},R=Stats1
        :, PORT=${stats1},ADDR=0,TIMEOUT=1,HIST_SIZE=256,XSIZE=${XSIZE},YSIZE=${YSIZE},
        NCHANS=${NCHANS}\")")
    include_lines+=("dbLoadRecords(\"${path_templates}areaDetector.template\")")
    add_lines "st.cmd" "areaDetector_registerRecordDeviceDriver(pdbbase)"
}

```

```

        sed -i 's|dbLoadRecords("../db/areaDetector.db","user=thomas")|# dbLoadRecords("../db
        /areaDetector.db","user=thomas")|' st.cmd
        sed -i "/iocInit()/ i\asynSetTraceIOMask(\"${url1}\",0,2)\n" st.cmd
#       sed -i "/iocInit()/ a\\\ncreate_monitor_set(\"auto_settings.req\", 30, \"P=${prefix}\")" st
        .cmd
        echo "Konfiguration von st.cmd abgeschlossen"
# NDStdArraysConfigure(portName, queueSize, blockingCallbacks, NDArrayPort, NDArrayAddr, maxMemory)
# NDStdArraysConfigure("ARR1", 2, 0, "CAM1", 0, 0)
}

function make_ioc
{
    text "Aufräumen und bauen"
    cd ${trunk}
    make distclean
    make
    text "make abgeschlossen"
}

function start_ioc
{
    text " start: ./st.cmd "
    cd ${trunk}
    cd iocBoot/ioclinux-${maschine}
    ./st.cmd
    echo "st.cmd ausgeführt."
}

function main
{
    intro
    set_variables
    print_variables
    purge_old_data
    create_directories
    install_packages

    build_epics_base
    fetch_external_files
    extract_files
    garbarger_collector
    set_external_release
    make_external_ioc
    copy_dbd_files
    manage_templates
    copy_plugin_files

    set_release
    set_makefile_src
    set_makefile_Db
    set_st_cmd

    make_ioc
    start_ioc
    text "areaDetector-Skript Ende."
}

main

```

A.2 Automatisierte Optimierung - Skripte zur Steuerung

Das folgende Skript führt die automatisierte Optimierung durch. Das angegebene Beispiel nutzt den Korrekturdipol *I1SH02*, um den Quadrupol *I1QV01* ablenkfrei einzustellen. Als sehr wichtige Einstellung hat sich die *ROI* (Region Of Interest) erwiesen. Sie sollte möglichst groß gewählt werden, um möglichst viele Bildpunkte in die Berechnung mit einzubeziehen, jedoch sollte vor allem vermieden werden, dass Rahmentreffer in diesem Bereich liegen können, was die Wahl der Größe dieses Bereichs einschränkt.

```
#!/bin/bash

function set_parameter_per_scriptcall
{
    start_factor=0.03
    shrinking_factor=0.08
    angle_step=1.3
    turns=2
    pi='echo "4*a(1)" | bc -l'
    target_frame_threshold=10
    beam_not_on_target_threshold=5
}

function set_parameter_per_quadrupol
{
    angle_iterator=0
    stored_points_iterator=0
    quadrupol="I1QV01"
    steerer="I1SH02"
    target="I2T1"
#    raw_data_file="working_dir/measure${quadrupol}_raw.dat"
    raw_data_file="measure_data.dat"
    echo "" > ${raw_data_file}
    quadrupol_max_current=6
    quadrupol_min_current=-6
    steerer_max_current=3
    steerer_min_current=-3
    target_border_left='echo "303 + ${target_frame_threshold}" | bc -l'
    target_border_right='echo "303 + 106 - ${target_frame_threshold}" | bc -l'
    target_border_top='echo "228 + ${target_frame_threshold}" | bc -l'
    target_border_bottom='echo "228 + 118 - ${target_frame_threshold}" | bc -l'
    quadrupol_aspect='echo "(${quadrupol_max_current}-${quadrupol_min_current})*${start_factor}" | bc -l'
    steerer_aspect='echo "(${steerer_max_current}-${steerer_min_current})*${start_factor}" | bc -l'
#    caput digi:ROI1:MinX 313
#    caput digi:ROI1:SizeX 86
#    caput digi:ROI1:MinY 238
#    caput digi:ROI1:SizeY 98

#    caput -S digi:ch:URL1 "http://192.168.5.32/cgi-bin/viewer/video.jpg?channel=7"
#    caput digi:Stats1:CentroidThreshold_RBV
#    caput digi:Stats1:CentroidThreshold
#    caput digi:ROI1:MinX
#    caput digi:ROI1:MinY
#    caput digi:ROI1:SizeX
#    caput digi:ROI1:SizeY
#    caget areaDetector:getMaxX
#    caget areaDetector:getMaxY
#    caget digi:Stats1:SigmaX_RBV
#    caget digi:Stats1:SigmaY_RBV
}

function get_axis
{
    if [ "${steerer}" == "H" ]
```

```

then
#       get_beam_coordinate="caget -t areaDetector:getMaxX"
#       axis="X"
#       get_beam_coordinate="caget -t IOSH03:outCur"
#       target_border_low=${target_border_left}
#       target_border_high=${target_border_right}
elif [ "echo ${steerer} | cut -c4" == "V" ]
then
    axis="Y"
#       get_beam_coordinate="caget -t areaDetector:getMaxY"
#       target_border_low=${target_border_top}
#       target_border_high=${target_border_bottom}
else
    get_beam_coordinate="Error - Steerer Ausrichtung nicht erkannt."
fi
}

function get_beam_coordinate
{
    waiting_time=1.25
    echo "wait for digitizer and areaDetector ${waiting_time}"
    sleep ${waiting_time}
    beam_coordinate='caget -t areaDetector:getMax${axis}'
    beam_position_x='caget -t areaDetector:getMaxX'
    beam_position_y='caget -t areaDetector:getMaxY'
}

function measure_beam_position_without_beam
{
    get_beam_coordinate
    beam_position_x_without_beam=${beam_position_x}
    beam_position_y_without_beam=${beam_position_y}
    echo "Kein Beam = ${beam_position_x_without_beam} ${beam_position_y_without_beam}"
}

function get_beam_position_without_beam
{
    if [ ${target} == "IOT4" ]
    then
        old_G0SH01_value='caget -t G0SH01:outCur'
        old_G0SV01_value='caget -t G0SV01:outCur'
        caput G0SH01:outCur 3
        caput G0SV01:outCur -3
        measure_beam_position_without_beam
        caput G0SH01:outCur ${old_G0SH01_value}
        caput G0SV01:outCur ${old_G0SV01_value}
    else
        caput IOF1:drive 1
        measure_beam_position_without_beam
        caput IOF1:drive 1
    fi
}

function initialize_next_quadrupol
{
    set_parameter_per_quadrupol
    get_axis
    measure_beam_position_without_beam
}

function calc_point
{
    quadrupol_current='echo "(${quadrupol_max_current}+(${quadrupol_min_current}))/2+${
        quadrupol_aspect}*s(${angle_iterator}*${angle_step})*e(l(1/${start_factor}/2)/(2*${pi}*
        ${turns})*${angle_iterator}*${angle_step}))" | bc -l'

```

```

steerer_current='echo "(${steerer_max_current}+(${steerer_min_current}))/2+${steerer_aspect
}*c(${angle_iterator}*${angle_step})*e(1/(${start_factor}/2)/(2*${pi}*${turns})*${
angle_iterator}*${angle_step}))" | bc -l'
}

function is_point_out_of_range
{
    if [ 'echo "${steerer_min_current} <= ${steerer_current} && ${steerer_current} <= ${
steerer_max_current} && ${quadrupol_min_current} <= ${quadrupol_current} && ${
quadrupol_current} <= ${quadrupol_max_current}" | bc -l' ]
    then
        return "0"
    else
        return "1"
    fi
}

function calc_next_point
{
    calc_point
    if [ 1 == is_point_out_of_range ]
    then
        quadrupol_aspect='echo "${quadrupol_aspect}*${shrinking_factor}" | bc -l'
        steerer_aspect='echo "-${steerer_aspect}*${shrinking_factor}" | bc -l'
        rekursionstiefe_calc='echo "${rekursionstiefe_calc}+1" | bc -l'
        echo "Rekursionstiefe ${rekursionstiefe_calc}"
        calc_next_point
    fi
    angle_iterator='echo "${angle_iterator}+1" | bc -l'
}

function set_measure_point
{
    caput ${quadrupol}:outCur ${quadrupol_current}
    caput ${steerer}:outCur ${steerer_current}
    sleep 0.01 # reicht moeglicherweise nicht
    until [[ 'caget -t ${quadrupol}:stDacNotOnSetValMsg' == "Ok" && 'caget -t ${steerer}:
stDacNotOnSetValMsg' == "Ok" ]]
    do
        echo "Warte auf CPS-Netzteil"
        sleep 0.1
    done
    echo "Wenn ich eben gerade nicht auf die Netzteile gewartet habe, ist etwas schief gelaufen
. >sleep< vor >stDacNotOnSetValMsg< groesser waehlen."
}

function measure_point
{
    rekursionstiefe_calc=1
    calc_next_point
    set_measure_point
    get_beam_coordinate
}

function is_beam_on_target
{
    if [ 1 == 'echo "( ${target_border_low} <= ${beam_coordinate} ) && ( ${beam_coordinate} <=
${target_border_high} ) && ( sqrt( (${beam_position_x}-${beam_position_x_without_beam})
^2 ) > ${beam_not_on_target_threshold} ) && ( sqrt( (${beam_position_y}-${
beam_position_y_without_beam})^2 ) > ${beam_not_on_target_threshold} )" | bc -l' ]
    then
        return "1"
    else
        return "0"
    fi
}

```



```

function measure_next_point
{
    measure_point
    if [ 0 == is_beam_on_target ]
    then
        calc_next_point
        rekursionstiefe_mess='echo "${rekursionstiefe_mess}+1" | bc -l '
        echo "Rekursionstiefe ${rekursionstiefe_mess}"
        measure_next_point
    fi
}

function write_measured_point_to_file
{
    echo "Point ${stored_points_iterator} steerer_current ${steerer_current} quadrupol_current
        ${quadrupol_current} beam_coordinate ${beam_coordinate}"
    echo "${steerer_current}          ${quadrupol_current}          ${beam_coordinate}" >> ${
        raw_data_file}
    stored_points_iterator='echo "${stored_points_iterator}+1" | bc -l '
}

function run_fitting
{
    gnuplot deflection_free_fit_script.gnuplot
    readin fitparameter
#    a="'sed -n '1p' fit_data_file '"
#    b="'sed -n '2p' fit_data_file '"
#    c="'sed -n '3p' fit_data_file '"
#    d="'sed -n '4p' fit_data_file '"
    steerer_current_for_deflection_free_quadrupol="'sed -n '5p' fit_data_file '"
}

function run_quadrupol_measurement
{
    initialize_next_quadrupol
    while [ 1 == 'echo "${stored_points_iterator} < 30 " | bc -l ' ]
    do
        rekursionstiefe_mess=1
        measure_next_point
        write_measured_point_to_file
        if [ 1 == 'echo "${stored_points_iterator} > 4" | bc -l ' ]
        then
            run_fitting
        fi
    done
}

set_parameter_per_scriptcall
run_quadrupol_measurement
caput ${steerer}:outCur ${steerer_current_for_deflection_free_quadrupol}

```

Die Anpassung der automatisierten Optimierung wird mit der Software *gnuplot* durchgeführt, dazu werden die folgenden Befehle abgearbeitet. Das unter Anhang A.2 aufgeführte Skript führt nach jedem neu gewonnenem Messpunkt diese Anpassung aus, womit deutlich sichtbar wird, wie die Unsicherheiten mit jedem Schritt sinken. Bei Rahmentreffern können diese Unsicherheiten sprunghaft ansteigen.

```

#####
###                               ###
##   developed with   ##
##   gnuplot v4.6     ##
###                               ###
#####

fit_data_file="fit_data.dat"

```

```
a='sed -n '1p' fit_data.dat '  
b='sed -n '2p' fit_data.dat '  
c='sed -n '3p' fit_data.dat '  
d='sed -n '4p' fit_data.dat '  
  
f(x,y)=a*x+b*y+c*x*y+d  
fit f(x,y) "measure_data.dat" using 1:2:3:(1) via a, b, c, d  
  
set print "fit_data.dat"  
print a  
print b  
print c  
print d  
print -b/c  
set print
```

Literatur

- [1] Ferdinand Braun. “Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufs variabler Ströme”. In: *Ann. Phys. Chem.* 60 (1897), S. 552. URL: <http://www.cdvandt.org/Braun%20CRT.pdf>.
- [2] E. Rutherford. “The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom”. In: *Phil. Mag. Ser.6* 21 (1911), S. 669–688. DOI: 10.1080/14786440508637080.
- [3] S. Y. Lee. *Accelerator Physics*. 2nd Edition. Indiana University, USA: World Scientific, 2004.
- [4] K. Wille. *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen - Eine Einführung*. 2. überarb. und erw. Aufl. Bd. 2. Auflage. serie. Stuttgart: Teubner Studienbücher : Physik, 1996. ISBN: 3-5-1-9-1-3087-4.
- [5] M. S. Livingston und J. P. Blewett. *Particle Accelerators*. New York: McGraw-Hill Book Company, INC, 1962. URL: <https://archive.org/details/ParticleAccelerators>.
- [6] Oliver Sim Brüning u. a. *LHC Design Report Vol. 1*. CERN Yellow Reports: Monographs. Geneva: CERN, 2004. URL: https://edms.cern.ch/ui/file/445830/5/Vol_1_Chapter_2.pdf.
- [7] Oliver Sim Brüning u. a. *LHC Design Report Vol. 2*. CERN Yellow Reports: Monographs. Geneva: CERN, 2004. URL: https://edms.cern.ch/ui/file/445914/9/Vol_2_Chapter_2.pdf.
- [8] *The Stanford Linear Accelerator Center*. abgerufen am 12.5.2017. URL: <https://www.slac.stanford.edu/gen/grad/GradHandbook/slac.html>.
- [9] John S. Nodvick und David S. Saxon. “Suppression of Coherent Radiation by Electrons in a Synchrotron”. In: *Phys. Rev.* 96 (1 1954), S. 180–184. DOI: 10.1103/PhysRev.96.180. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.96.180>.
- [10] John M. J. Madey. “Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field”. In: *J. Appl. Phys.* 42 (1971), S. 1906–1913. DOI: 10.1063/1.1660466.
- [11] J. Gaudin, H. Sinn und Th. Tschentscher. “The European XFEL in Hamburg: Status and beamlines design”. In: (2011), S. 63–67. DOI: 10.1051/uvx/2011009.
- [12] K. Sonnabend. “Mit Kohlenstoff gegen Krebs”. In: *Phys J* 14 / 12 (2015), S. 10.
- [13] J. Auerhammer u. a. “The S-DALINAC facility — Operational experience from the accelerator and the experimental installations”. In: *Nucl. Phys. A* 553 (1993), S. 841–844. ISSN: 0375-9474. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474\(93\)90708-6](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474(93)90708-6). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947493907086>.
- [14] A. Richter. “Operational Experience at the S-DALINAC”. In: *Proceedings of EPAC, Spain* (1996), S. 110–114.
- [15] Y. Poltoratska u. a. “Status and recent developments at the polarized-electron injector of the superconducting Darmstadt electron linear accelerator S-DALINAC”. In: *J. Phys. Conference Series* 298.1 (2011), S. 012002. URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/298/i=1/a=012002>.

- [16] Y. Fritzsche. "Aufbau und Inbetriebnahme einer Quelle polarisierter Elektronen am supraleitenden Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2011. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2801/>.
- [17] Y. Poltoratska u. a. "Status and recent developments at the polarized-electron injector of the superconducting Darmstadt electron linear accelerator S-DALINAC". In: *J. Phys. Conference Series* 298 (2011), S. 012002. ISSN: 1742-6596. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/57227/>.
- [18] M. Espig. "Entwicklung, Aufbau und Charakterisierung einer variabel repetierenden, spinpolarisierten Elektronenkanone mit invertierter Isolatorgeometrie". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2016. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5328/>.
- [19] M. Wagner. "Erzeugung und Untersuchung gepulster polarisierter Elektronenstrahlen am S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2013. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/62495/>.
- [20] C. Eckardt u. a. "The S-DALINAC polarized injector SPIN - performance and results". In: *Proceedings of PAC, USA* (2011), S. 853–855. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/57226/>.
- [21] M. Arnold. "Auslegung, Planung und Aufbau einer dritten Rezirkulation mit ERL-Modus für den S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2016.
- [22] K. Sonnabend u. a. "The Darmstadt High-Intensity Photon Setup (DHIPS) at the S-DALINAC". In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 640 (Juni 2011), S. 6–12. DOI: 10.1016/j.nima.2011.02.107.
- [23] D. Savran u. a. "Fine Structure of the Pygmy Dipole Resonance in ^{136}Xe ". In: *Phys. Rev. Lett.* 100 (23 2008), S. 232501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.232501. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.232501>.
- [24] K. Lindenberg. "Development and Construction of the Low-Energy Photon Tagger NEPTUN". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2007. URL: <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000956>.
- [25] D. Savran u. a. "The low-energy photon tagger NEPTUN". In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 613.2 (2010), S. 232–239. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.038>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209022189>.
- [26] L. Schnorrenberger u. a. "Characterization of detectors using the photon tagger {NEPTUN} for energies up to 20 MeV". In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 735 (2014), S. 19–23. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.08.046>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213011728>.
- [27] M. Knirsch. "Konzeption, Aufbau und Erprobung eines hochauflösenden QCLAM-Elektronenspektrometers mit großem Raumwinkel und hoher Impulsakzeptanz am Elektronenbeschleuniger S-DALINAC". Diss. Technische Hochschule Darmstadt, 1991.
- [28] P. von Neumann-Cosel u. a. "Complete Spectroscopy of an Isobaric Analog Resonance with the $(e, e'p)$ Reaction". In: *Phys. Rev. Lett.* 78 (15 1997), S. 2924–2927. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.2924. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.78.2924>.

- [29] N. Ryezayeva u. a. “Measurement of the Reaction $^2\text{H}(e, e')$ at 180° Close to the Deuteron Breakup Threshold”. In: *Phys. Rev. Lett.* 100 (17 2008), S. 172501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.172501. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.172501>.
- [30] C. Lüttge u. a. “Large-aperture system for high-resolution 180° electron scattering”. In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 366.2–3 (1995), S. 325–331. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00497-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00497-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900295004971>.
- [31] H. Fujita u. a. “One- and two-phonon mixed-symmetry states in ^{94}Mo in high-resolution electron and proton scattering”. In: *Nucl. Phys. A* 788.1–4 (2007), S. 94–99. ISSN: 0375-9474. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.01.053>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947407000954>.
- [32] O. Burda u. a. “High-Energy-Resolution Inelastic Electron and Proton Scattering and the Multiphonon Nature of Mixed-Symmetry 2^+ States in ^{94}Mo ”. In: *Phys. Rev. Lett.* 99 (9 2007), S. 092503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.092503. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.092503>.
- [33] A. W. Lenhardt u. a. “A silicon microstrip detector in a magnetic spectrometer for high-resolution electron scattering experiments at the S-DALINAC”. In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 562.1 (2006), S. 320. ISSN: 01689002. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/49293/>.
- [34] *Datenerhebung durch AutoCAD*. persönliches Gespräch, 11.5.2017.
- [35] W. Cunningham. “The WyCash Portfolio Management System”. In: *SIGPLAN OOPS Mess.* 4.2 (Dez. 1992), S. 29–30. ISSN: 1055-6400. DOI: 10.1145/157710.157715. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/157710.157715>.
- [36] C. W. Burandt. “Optimierung und Test der digitalen Hochfrequenzregelung und Entwicklungen für das EPICS-basierte Beschleunigerkontrollsystem am S-DALINAC”. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2017. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/85847/>.
- [37] M. Konrad. “Development and commissioning of a digital rf control system for the S-DALINAC and migration of the accelerator control system to an EPICS-based system”. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2013. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/62425/>.
- [38] C. Burandt u. a. “The EPICS-based Accelerator Control System of the S-DALINAC”. In: *Proceedings of ICALEPCS, USA* (2013), S. 332–335. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/70396/>.
- [39] C. Burandt u. a. “Status of the migration of the S-DALINAC accelerator control system to EPICS”. In: *Proceedings of PCaPAC, India* (2012), S. 166–168.
- [40] C. Burandt u. a. “Status of the Migration of the S-DALINAC Accelerator Control System to EPICS”. In: *Proceedings of PCaPAC 2012* (2013), S. 166–168. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/61974/>.
- [41] A. Araz. “Aufbau und Erprobung einer digitalen HF-Regelung und Aufbau eines modularen Messsystems zur Energiestabilisierung für den S-DALINAC”. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2009. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/39245/>.

-
- [42] A. Kuhl. "Aufbau einer Kanonensteuerung auf HV-Potential und Entwicklung einer Prozessdatenerfassung mit dem QM07 für den S-DALINAC". (unveröffentlicht). Diplomarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [43] S. G. Richter. "Design and Implementation of a New Local Control System at the S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2001. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/36901/>.
- [44] O. Patalakha. "Design and implementation of a modular client/server control system for the S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2006. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/22831/>.
- [45] M. Hertling. "Aufbau einer zentralen relationalen Datenbank und Entwicklung einer graphischen Benutzeroberfläche für den S-DALINAC". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2008. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/34309/>.
- [46] L. Dalesio, M. Kraimer und A. Kozubal. "EPICS architecture". In: *Proceedings of ICALEPCS, Japan* (1991).
- [47] L. R. Dalesio u. a. "The experimental physics and industrial control system architecture: past, present, and future". In: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 352.1 (1994), S. 179–184. ISSN: 0168-9002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91493-1](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(94)91493-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294914931>.
- [48] *Experimental Physics and Industrial Control System*. abgerufen am 10.5.2017. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/>.
- [49] C. Burandt u. a. "Socket-CAN device support for EPICS IOCs". In: *Proceedings of PCaPAC, India* (2012), S. 163–165. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/63882/>.
- [50] J. O. Hill und R. Lange. *EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual*. abgerufen am 1.5.2017. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>.
- [51] *Channel Access – Protocol Specification*. abgerufen am 1.5.2017. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>.
- [52] *Control System Studio*. abgerufen am 2.5.2017. URL: <http://controlsystemstudio.org/>.
- [53] K. Kasemir. "Control System Studio applications". In: *Proceedings of ICALEPCS, USA* (2007), S. 692–694.
- [54] M. Clausen u. a. "Control System Studio integrated operating, configuration and development". In: *Proceedings of ICALEPCS, Japan* (2009), 667–669.
- [55] *Control System Studio*. URL: <http://cs-studio.sourceforge.net/>.
- [56] J. Hatje u. a. "Control System Studio (CSS)". In: *Proceedings of ICALEPCS, USA* (2007), 37–39. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ica07/PAPERS/MOPB03.PDF>.
- [57] O. Gruber. u. a. "The Eclipse 3.0 platform: Adopting OSGi technology". In: *IBM Systems Journal* 44,289 (2005).
- [58] M. Konrad u. a. "Control System Studio archiver with PostgreSQL back-end: Optimizing performance and reliability for a production environment". In: *Proceedings of PCaPAC, India* (2012), S. 15–17. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/63883/>.
- [59] *Qt Documentation*. abgerufen am 3.5.2017. URL: <http://doc.qt.io/>.

-
- [60] *EPICS Qt Framework*. abgerufen am 4.5.2017. URL: <http://www.epicsqt.org/>.
- [61] A. Krugmann. “Entwicklung einer lokalen Target-Steuerung am S-DALINAC”. (unveröffentlicht). Magisterarb. Bachelor Arbeit, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [62] E. D. Courant und H. S. Snyder. “Theory of the alternating-gradient synchrotron”. In: *Ann. Phys.* 3.1 (1958), S. 1 –48. ISSN: 0003-4916. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-4916\(58\)90012-5](http://dx.doi.org/10.1016/0003-4916(58)90012-5). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003491658900125>.
- [63] *Function Minimization*. abgerufen am 23.4.2017. URL: <http://seal.web.cern.ch/seal/documents/minuit/mntutorial.pdf>.
- [64] *AreaDetector*. abgerufen am 23.4.2017. URL: <http://cars.uchicago.edu/software/epics/areaDetector.html>.
- [65] *AreaDetector Documentation*. abgerufen am 2.5.2017. URL: <http://cars.uchicago.edu/software/epics/areaDetectorDoc.html>.
- [66] B. Widrow, D. E. Rumelhart und M. A. Lehr. “Neural Networks: Applications in Industry, Business and Science”. In: *Commun. ACM* 37.3 (März 1994), S. 93–105. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/175247.175257. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/175247.175257>.

Danksagung

Allen die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle danken.

Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Norbert Pietralla danke ich für die Möglichkeit, in seiner Arbeitsgruppe diese Arbeit anfertigen zu können und dieses spannende Thema bearbeiten zu dürfen. Für die gute, stets hilfreiche Betreuung, sowie für die aufmunternden Worte in der schwierigen Phase gegen Ende meiner Promotion möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich danken. Trotz des sehr engen Terminkalenders hatte Herr Prof. Pietralla stets Zeit für hilfreiche Anmerkungen und klärende Gespräche.

Dr. Jonny Birkhan danke ich für die intensive Unterstützung und Betreuung, für die Hilfen, die er mir gab, die Anregungen und die Kritik. Ohne seinen Einsatz wäre diese Arbeit wohl nicht zu dem geworden. Auch die Möglichkeit jederzeit drückende Fragen diskutieren zu können, zu jedem Thema eine zweite Meinung einholen zu können und die persönliche Fürsorge soll hier mit großen Dank anerkannt werden.

Dr. Christoph Burandt möchte ich für die Arbeit danken, die er sich durch die zahlreichen Korrekturen meiner Arbeit gemacht hat, sowie die unzähligen Hilfestellungen und Antworten auf alle Fragen zum Kontrollsystem, die in meiner Zeit am Beschleuniger aufkamen.

Ebenfalls zum guten Gelingen dieser Arbeit haben Dr. Markus Wagner, Dr. Marco Brunken und Dr. Mie Marsilius beigetragen. Ihnen sei an dieser Stelle mein Dank ausgesprochen. Jonas Pforr möchte ich für die Hinweise und Verständnishilfen zur Strahldynamik danken.

Einen ganz persönlichen Dank möchte ich an Dipl. Ing. (FH) Tatjana Würslin richten, für ihre Freundschaft seit vielen Jahren, die aufbauenden Worte, die Zeit, die sie sich nahm und mir gab. Für die seelische Fürsorge, die mir sehr half, den Blick zu heben und weiter mit positiver Einstellung gute Entscheidungen zu treffen. Für ihre tröstenden und aufbauenden Worte sei ihr an dieser Stelle nochmals ausdrücklich gedankt.

Meiner Familie möchte ich danken, für die Unterstützung, die ich erfahren habe, nicht nur während der letzten Phase meiner Promotion, sondern durch mein gesamtes Studium hindurch.

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Darmstadt, den 15. Mai 2017

Thomas Schösser